



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

IDENTIFIKACE ZMĚNY TEXTURY POVRCHU VYBRANÝCH MATERIÁLŮ METODOU AKUSTICKÉ EMISE

IDENTIFICATION OF CHANGES IN SURFACE TEXTURE OF THE SELECTED MATERIALS BY
THE METHOD OF ACOUSTIC EMISSION

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

JAN ELIÁŠ

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. PAVEL MAZAL, CSc.

BRNO 2014

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie

Akademický rok: 2013/2014

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Jan Eliáš

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Strojírenská technologie (2303R002)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Identifikace změny textury povrchu vybraných materiálů metodou akustické emise

v anglickém jazyce:

Identification of changes in surface texture of the selected materials by the method of acoustic emission

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Cílem práce je stanovení změn parametrů signálu akustické emise při kontaktu pístního kroužku s povrchem pohybující se zkušební tyče užitím zařízení Dakel Xedo a stávajícího přípravku pro kontaktní zkoušky. Měření bude provedeno nejméně na dvou vybraných materiálech s různou texturou povrchu.

Cíle bakalářské práce:

Bakalářská práce musí obsahovat: (odpovídá názvům jednotlivých kapitol v práci)

1. Úvod
2. Přehled současného stavu poznání
3. Analýza problému a cíl práce
4. Materiál a metody
5. Výsledky
6. Diskuze
7. Závěr
8. Seznam použitých zdrojů

Forma práce: průvodní zpráva

Typ práce: experimentální; Účel práce: výzkum a vývoj

Rozsah práce: cca 27 000 znaků (15 - 20 stran textu bez obrázků).

Zásady pro vypracování práce:

http://dokumenty.uk.fme.vutbr.cz/BP_DP/Zasady_VSKP_2014.pdf

Šablona práce: http://dokumenty.uk.fme.vutbr.cz/UK_sablona_praci.zip

Seznam odborné literatury:

KOPEC, Bernard. Nedestruktivní zkoušení materiálů a konstrukcí. 1. vyd. Brno : Akademické nakladatelství CERM, 2008. 610 s. ISBN 978-80-7204-591-4.

KREIDL, Marcel, ŠMÍD, Radislav. Technická diagnostika : senzory - metody - analýza signálu. 1. vyd. Praha : Technická literatura BEN, 2006. 410 s. ISBN 80-7300-158-6.

KLYUEV, Vladimir, ZUSMAN, George. Nondestructive Testing and Diagnostics : Handbook. 1st edition. Houston : Metrix Instr.Co., 2004. 656 s.

MOORE, Patrick O.: NNDT Handbook – Acoustic Emission Testing : 3rd Edition Columbus USA, ASNT, 2005. 440 s. ISBN 1-57117-106-1.

Vedoucí bakalářské práce: doc. Ing. Pavel Mazal, CSc.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2013/2014.

V Brně, dne 4.2.2014

L.S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
Ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

Bakalářská práce se zabývá sledováním vlivu změny drsnosti povrchu vzájemně se pohybujících kovových těles na vybrané parametry signálu akustické emise (AE). Vyhodnoceny jsou záznamy hodnot z měření signálu AE při pohybu bronzového a litinového tělesa po povrchu stabilní ocelové tyče. Výsledky tvoří podklad pro další výzkum možnosti hodnocení stupně opotřebení povrchu pomocí metody AE. Měření bylo realizováno na přípravku určenému k měření AE za pomoci systému Dakel Xedo.

Klíčová slova

akustická emise, drsnost povrchu, RMS signál, emitování AE, analýza

ABSTRACT

This Bachelor thesis deals with monitoring changes in surface roughness of moving metal objects rubbing each other on selected parameters of acoustic emissions. Parameters of the AE signal during the movement of bronze and cast iron bodies on the surface of a fixed steel rod were measured, recorded and analyzed. These results can serve for further research on assessment possibilities of the degree of wear of a surface using the AE method. Measuring was performed using a measuring product intended for AE and the Dakel sensors and measuring software.

Keywords

acoustic emission, surface roughness, RMS signal, emit AE, analysis

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ELIÁŠ, Jan. *Identifikace změny textury povrchu vybraných materiálů metodou akustické emise*. Brno 2014. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. 46 s. Vedoucí práce: doc. Ing. Pavel Mazal, CSc.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma **Identifikace změny textury povrchu vybraných materiálů metodou akustické emise** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum

Jan Eliáš

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto doc. Ing. Pavlu Mazalovi, CSc. za cenné připomínky a rady při vypracování bakalářské práce.

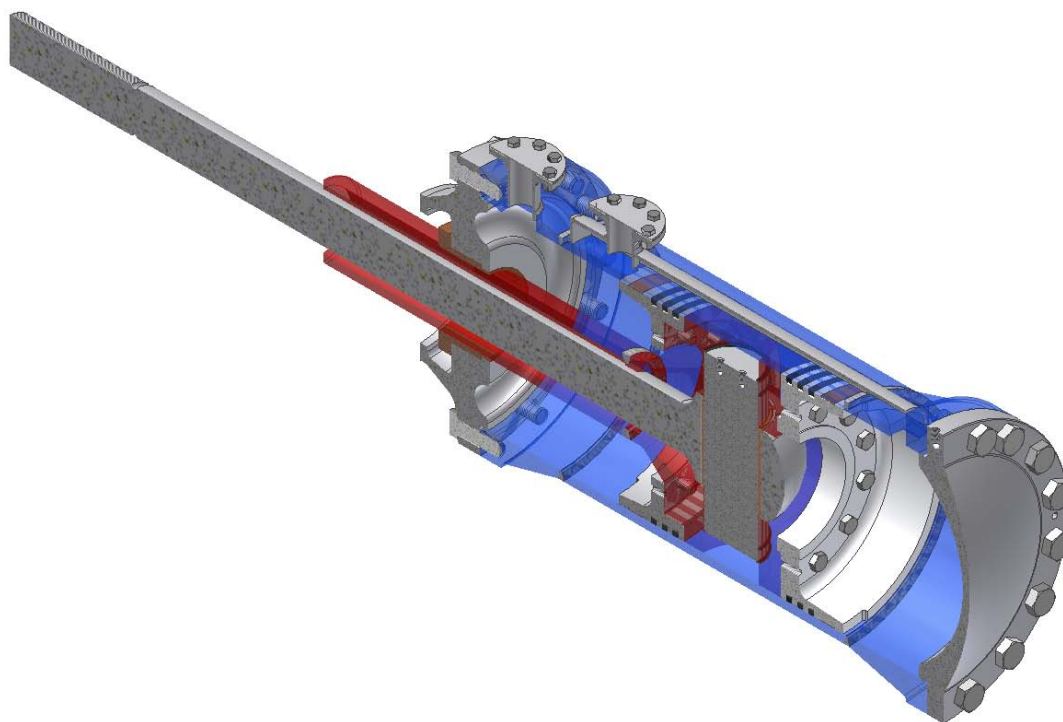
OBSAH

ÚVOD.....	9
1 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ.....	10
1.1 Drsnost povrchu jako ukazatel jakosti	10
1.2 Vytváření povrchu.....	11
1.3 Fyzikální podstata vzniku nového povrchu.....	11
1.4 Základní pojmy drsnosti povrchu.....	12
1.5 Drsnost povrchu a funkce ploch součástí.....	13
1.6 Vztah drsnosti a funkce	14
1.7 Vztah mezi drsností a rozměrovou tolerancí.....	14
1.8 Vyhodnocování parametrů drsnosti	15
1.8.1 Kvalitativní hodnocení.....	15
1.8.2 Nepřímé kvantitativní hodnocení.....	15
2 TEORIE AKUSTICKÉ EMISE.....	16
2.1 Základní charakteristiky AE jako NDT metody	16
2.2 Fyzikální postata akustické emise.....	18
2.3 Událost akustické emise	19
2.4 Nespojité akustické emise	19
2.5 Spojité akustické emise	20
2.6 Zdroj AE a jeho typy.....	21
2.7 Klepnutí tyče do povrchu materiálu.....	21
2.8 Detekce a měřicí trasa elektrického signálu AE	21
2.9 Snímače AE.....	22
2.9.1 Piezoelektrické snímače.....	22
2.9.2 Rezonanční a širokopásmové snímače	22
2.9.3 Instalace snímačů	22
2.9.4 Přímá instalace snímače.....	22
2.9.5 Instalace snímačů přes vlnovod	22
2.9.6 Kalibrace snímačů.....	23
2.10 Předzesilovače AE.....	23
2.11 Kabelové trasy	23
2.12 Vyhodnocení akustické emise	23
2.12.1 Informativní úroveň	23
2.12.2 Standardní úroveň	24
2.12.3 Pokročilá úroveň	24
2.13 Základní parametry spojitého signálu	24
2.14 Popis nespojitého signálu	24
2.15 Vícekanálové měření	25
3 PRAKTICKÁ ČÁST	26
3.1 Cíl práce, vědecká otázka a pracovní hypotéza	26
3.2 Průběh měření	26
3.3 Sledované parametry	27
3.4 Materiály a metody	27
4 VÝSLEDKY MĚŘENÍ.....	29
4.1 Použitý vzorek - těsnící kroužek.....	29
4.2 Použitý vzorek - šedá litina.....	31
4.2.1 Výsledky z měření na suchém povrchu tyče	31

4.2.2	Výsledky měření na mazaném povrchu	33
4.3	Použitý vzorek - bronz	35
4.3.1	Výsledky z měření na suchém povrchu tyče	35
4.3.2	Výsledky měření na mazaném povrchu	39
5	DISKUZE	43
	ZÁVĚR	44
	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	45
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	46

ÚVOD

Délka provozu a spolehlivost rozměrných technologických zařízení např. velkých energetických strojů je závislá především na opotřebení mechanických částí strojů. Pro provádění kontrol opotřebení je délka odstavení těchto zařízení časově i finančně náročná. Časté odstavení a údržba těchto zařízení za účelem kontrol a oprav má dopad na zvýšení přímých nákladů na opravu což především způsobuje velké ztráty ve výrobě podniku. Abychom předešli poruchám a kvůli objektivnímu plánování odstávek těchto zařízení je využíváno moderních prvků monitorování různými metodami. Sledují se hodnoty teploty, tlaku, měření vibrací apod. Při vlastních opravách a kontrolách se využívají zejména nedestruktivní metody zkoušení (dále nazývané jako NDT). Tato práce se zabývá experimentální možností sledování opotřebení pohyblivých částí metodou akustické emise včetně vlivu drsnosti povrchu v závislosti na použitých materiálech. Např. u přímočarých hydraulických servopohonů viz obr. 1 pro ovládání rozváděcího mechanismu vodní turbíny, kdy je obtížné zjistit z provozních parametrů zařízení jejich stav opotřebení bez demontáže části servomotoru, na které se váže celé odstavení turbíny. Metoda akustické emise (dále nazývanou jako AE) patří mezi NDT a umožňuje nám sledování opotřebení materiálu bez jeho porušení právě pro tyto případy opotřebení.



Obr. 1 Řez modelu servomotoru.

1 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

Konstrukce namáhané dynamicky jsou limitovány únavovými činiteli, vlastnostmi materiálu, jeho strukturou apod. Mechanické části, u nichž je analyzován únavový lom ukazují, že počátek vzniku lomu byl u velké části zkoumaných materiálů na povrchu nebo těsně pod povrchem součástí. Vezmeme-li v úvahu odolnost proti korozi pod napětím, lze usoudit, že stav a mikrostruktura povrchu součástí jsou prvotními činiteli, které ovlivňují podmínky pro vznik koroze a následující únavový lom [4].

Podstatný vliv na jakost povrchu funkčních ploch strojních součástí má mikrogeometrie (drsnost) povrchu. Funkce každé součásti je úzce závislá na povrchu obrobené plochy, protože funkční vlastnosti povrchu jsou do značné míry určovány jeho geometrickými parametry [4].

1.1 Drsnost povrchu jako ukazatel jakosti

Pro hodnocení jakosti strojních součástí má analýza drsnosti povrchu svůj význam. Z hlediska jakosti funkčních ploch je nutné soustředit se na oblast konstrukce při výrobě, kde se výrobek navrhuje, popřípadě do oblasti, kde se výrobek zkouší a ověřuje před vlastním provozem. Následně neméně důležitá je oblast výroby, která nese hlavní zodpovědnost za výrobu součástí. A poslední oblastí důležitou z hlediska jakosti ploch je měření a kontrola výrobků, kde se ověřuje, zda výrobky odpovídají normám a požadavkům kvality a provozu [4].

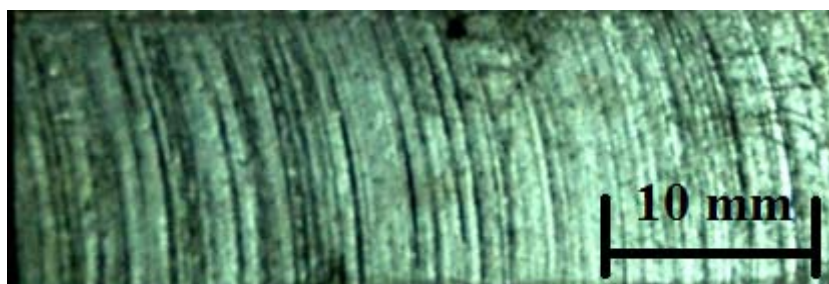
Důležitou úlohu při hodnocení povrchu hraje lidský činitel, a proto je možné sestavit určité zásady a doporučení pro co nejefektivnější výrobu. Příkladem může být několik zásad pro technologa [4]:

- dokonale se seznámit s nejefektivnějším způsobem výroby ploch požadované drsnosti,
- seznámit se s významem charakteristik drsností povrchu na výkresech, aby je bylo možné správně zabezpečit,
- šetřit finance a čas za výrobu hladších ploch než je nutné pro daný výrobek proto, aby součást byla vyrobena v co nejkratším čase,
- hodnoty drsnosti povrchu nejsou přesná čísla, je proto nutné se k nim co nejvíce přiblížit,
- zajistit bezpečnou ochranu součástí s významnými přesně dokončenými funkčními plochami, které nesmějí být poškozené. Následně by se tyto plochy měly kontrolovat i při montáži,
- při jakékoliv nejistotě o významu a hodnotě drsností povrchu tento údaj porovnat s konstrukcí,
- uvědomit si, že každá drsnost má svůj určitý směr nerovností. Pokud je předepsán určitý směr nerovností potom by drsnost měla být orientována převážně v tomto směru.

1.2 Vytváření povrchu

Nerovnosti povrchu, které se objevují na obrobené ploše, mají v mnoha případech charakteristické uspořádání, které je výsledkem vzájemných geometrických a kinematických vztahů mezi nástrojem a obrobkem doprovázených některými fyzikálními jevy. Na vlastnosti povrchové vrstvy, nebo charakter povrchu mají vliv podmínky obrábění, druh materiálu obrobku, materiál nástroje [4].

Největší vliv na tvar obráběné plochy má tvar špičky nástroje, který je definován v rovině, rovnoběžné se základní rovinou, poloměrem zaoblení a vedlejším úhlem nastavení. Významný vliv na drsnost povrchu má posuv, který je nejvýznamnější veličinou z hlediska kinematického vztahu mezi špičkou nástroje a obrobkem. Stopu po nástroji můžeme vidět na obr. 2 [4].



Obr. 2 Stopa po nástroji na litinovém vzorku Ra 3,27 μm .

Z metodického hlediska je možné rozlišovat dva druhy drsností a to teoretickou a skutečnou drsnost povrchu. Teoretická drsnost povrchu může být určena za předpokladů, že obráběný nástroj je považován za absolutně nedeformovatelný a ostří nástroje tvoří geometrické čáry. Potom je možné stanovit teoretickou největší výšku nerovností ze vzorců odpovídajících geometrickým schémátům kinematiky odebírané třísky. Skutečná drsnost povrchu se jak velikostí, tak tvarem liší od vypočtených teoretických hodnot. A lze jí měřit profilometrem, kdy např. tvar profilu soustruženého povrchu ztrácí svoji pravidelnost oproti povrchu teoretickému [4].

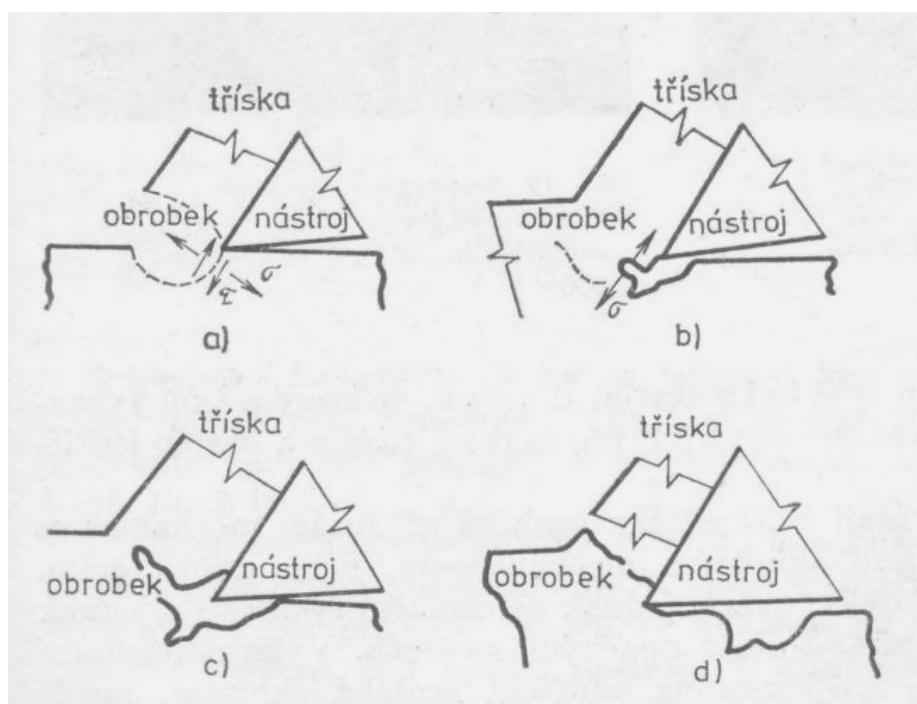
Příčiny změn tvaru profilu obrobeného povrchu je možné hledat v materiálových a technologických činitelích. Z hlediska materiálových vlivů víme, že řezání je proces plastické deformace, který se mění s řeznými podmínkami. Mezi technologické vlivy lze zahrnout chvění nástroje i obráběné součásti, v nerovnosti ostří řezného nástroje, jeho opotřebení i případná změna řezného prostředí [4].

Na zhoršení skutečné drsnosti mají největší vliv materiálové faktory. A to z důvodu vytváření nového povrchu, který je ovlivňován fyzikálními vlastnostmi obráběného materiálu a také podmínkami zatěžování, které vyvolává nástroj působící na obrobek během řezání. Neplynulá třísky se tvoří na obrobku takovým způsobem, že mohou vznikat na povrchu značné nesrovnalosti a trhliny, dochází ke kolísání řezné síly i chvění nástroje. Podobně se může chovat i plynulá třísky, pokud jsou zvoleny špatné řezné podmínky a začíná vznikat nárustek [4].

1.3 Fyzikální podstata vzniku nového povrchu

Je nutné věnovat pozornost možnostem vzniku provozních poruch, únavy, vzniku a šíření trhlin v důsledku koroze pod napětím apod. Takové poruchy jsou velmi často

ovlivňovány tvarem a charakterem povrchu. Změny na povrchu materiálu nastávají v okamžiku působení břitu nástroje, kdy zrna materiálu jsou působením nástroje deformována a kdy je tato deformace ukončena jejich porušením tj. lomem. Druh a charakter lomu je závislý na obráběném materiálu, jeho krystalické vazbě a na podmínkách deformace, které jsou pro obrábění určovány především řeznými podmínkami. Lom ve většině případů probíhá skluzovým mechanismem (dislokační proces) nebo dvojčatěním. Experimentálně bylo dokázáno, že při obrábění uhlíkové oceli na kořenech třísky vzniká před břitkem trhlinka viz obr. 3, která se šíří směrem určeným rovinou maximálních smykových napětí. Směr této roviny se mění tak, že při malých řezných rychlostech směřuje do materiálu a při větších rychlostech sleduje změnu polohy roviny maximálních smykových napětí [4].



Obr. 3 Model vzniku a šíření trhliny při obrábění:
a) vznik primární trhliny, b) šíření primární trhliny a vznik sekundární,
c) šíření sekundární trhliny, d) vytvoření obrobce [4].

1.4 Základní pojmy drsnosti povrchu

V důsledku používání různých technologických operací vznikají na povrchu strojních součástí nerovnosti, jejichž tvar je velmi rozmanitý. Zobrazený povrch ohraničuje součást a odděluje ji od druhého prostředí. Je to skutečný povrch oproti povrchu jmenovitému, ideálnímu, jehož jmenovitý tvar je předepsán na výkrese nebo na jiné technické dokumentaci [4].

Drsnost povrchu se vyhodnocuje od základního povrchu. Má tvar jmenovitého povrchu a jeho poloha odpovídá obecnému směru skutečného povrchu v prostoru. Pro získání profilu povrchu je třeba provést kolmý řez k základnímu povrchu viz obr. 4 [4].

Z profilu povrchu se pomocí přístrojů odvodí profil drsnosti (R-profil), profil vlnitosti (W-profil) a profil základního profilu (P-profil). Profil drsnosti je pak základem pro hodnocení parametrů profilu drsnosti povrchu [5].

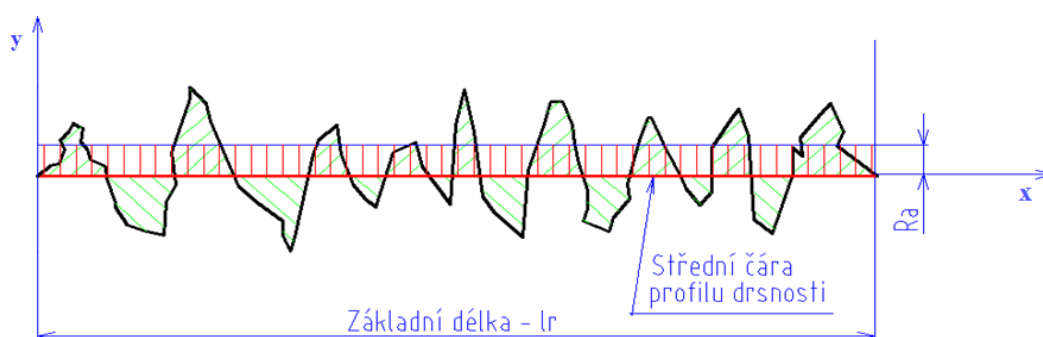
Metodika objektivního posuzování a hodnocení složky struktury povrchu - drsnost povrchu - má delší historii. Nejdříve byl používán sinusový model nerovností, v další etapě vývoje byl přednostně zaveden parametr R_a [5].

V souvislosti s novým pojetím geometrické specifikace výrobků (GPS) byl vytvořen dokonalejší systém posuzování a hodnocení struktury povrchu. Systém je ošetřen sadou norem [5].

Průměrnou aritmetickou úchylku posuzovaného profilu R_a , lze vypočítat jako aritmetický průměr absolutních hodnot souřadnic $Z(x)$ v rozsahu základní délky [5].

Průměrná aritmetická úchylka [5]:

$$R_a = \frac{1}{l} \int [y(x)] dx \quad (1)$$



Obr. 4 Zobrazení hodnoty R_a na povrchu materiálu [4].

Úplnější popis drsnosti povrchu lze získat z trojrozměrného hodnocení textury povrchu. Kvalifikace vybraných charakteristik ve všech třech rozměrech může poskytnout různé údaje pro komplexnější popis tvaru zkoumaného povrchu, který je tak žádaný pro výzkum různých problémů spojených s funkcí povrchu [4].

1.5 Drsnost povrchu a funkce ploch součástí

Hlavní pozornost při výběru charakteristiky drsnosti povrchu je zaměřena na povrchovou texturu funkčních plochy kvůli dosažení lepšího řízení procesů i optimalizace při vytváření nových prvků. Dalším aspektem je hledání takových charakteristik drsnosti, které lze použít pro předvídání toho, jak se bude součást chovat ve své funkci. [4]

Při volbě vhodné drsnosti povrchu jde o zabezpečení spolehlivé funkce obrobené plochy součásti, spolehlivé činnosti a dostatečné životnosti stroje nebo zařízení. Často je požadován jen určitý vzhled obrobeného povrchu. I při stejném způsobu opracování dochází k určitým odchylkám v drsnosti povrchu, a to i na jedné obrobené ploše. Různé obory strojírenství mají odlišné požadavky na funkci, přesnost, vyměnitelnost, spolehlivost a životnost výrobků z hlediska výrobních nákladů i montáže, a tím různé požadavky na drsnost, kterou je nutno dodržet v předepsaném rozmezí. Pro konstruktéry a technology je vhodné stanovení závislosti mezi drsností a takovým parametrem plochy, který jednoznačně definuje její funkci [4].

Volba jakosti povrchu může být posouzena z hlediska vztahu [4]:

- drsnosti a funkce,
- drsnosti a rozměrové tolerance,
- drsnosti a tolerance tvaru.

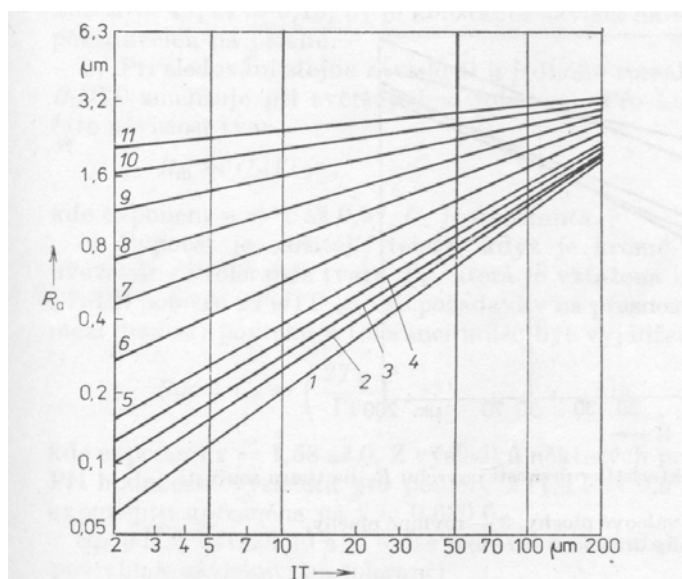
1.6 Vztah drsnosti a funkce

Povrchy a jejich vlastnosti mají stále větší význam. Proto je nutné pochopit podstatu vzniku povrchu a klasifikaci jeho charakteristik i jejich řízení přímo ve výrobě. Při zkoumání povrchu nelze od sebe oddělovat vznik a vlastnosti povrchu. Podstata styku dvou ploch, ať už za sucha, nebo s mazacím filmem, spolu s fyzikálními vlastnostmi materiálu určuje ve značném rozsahu vlastní funkci povrchu. Každá plocha, která byla vytvořena některou z technologických operací, je během své funkce vystavena namáhání. Obvykle se jedná o dvě plochy, které jsou ve vzájemném styku. Proto je nutné vzít v úvahu jejich geometrický tvar, průběh makronerovností i mikronerovností, které budou na sebe vzájemně dosedat [4].

Styk dvou pevných těles se většinou uskutečňuje v malých místních plochách. Přitom je velmi důležité, zda k jejich styku dochází za klidu nebo při vzájemném relativním pohybu. V prvním případě je stanovení střední skutečné stykové plochy snadnější, než u pohybujících se ploch, kde stanovuje pomocí několika měření [4].

1.7 Vztah mezi drsností a rozměrovou tolerancí

Zavedením kvantitativního hodnocení drsnosti povrchu se objevil požadavek, aby byly stanoveny závislosti mezi drsnostmi ploch strojních součástí a odpovídající rozměrové tolerance. Za předpokladu že existují zákonité vztahy mezi rozměrovou tolerancí a drsností povrchu, lze vyvodit, že tyto vztahy se budou měnit podle toho, který výrobní obor je bude využívat a o jaký druh výroby a výrobek se bude jednat. Na obr. 5 vyobrazená závislost dosahované průměrné drsnosti povrchu na rozměru součásti a na rozměrové toleranci. Průběhy závislostí ukazují, že u součástí malých rozměrů stoupá drsnost s rozměrovou tolerancí mnohem rychleji, než u součástí velkých rozměrů [4].



Obr. 5 Závislost charakteristiky drsnosti povrchu R_a na rozměru součásti a rozměrové toleranci [4].

1.8 Vyhodnocování parametrů drsnosti

1.8.1 Kvalitativní hodnocení

Mikrogeometrie povrchu se kvalifikuje na základě jeho porovnání se standardními povrchy o známé definované drsnosti. Tato porovnání se provádí hmatem, vizuálně nebo jednoduchými optickými pomůckami (lupou, komparačním mikroskopem). Vizuálně se přitom dosahuje přesnosti 70 μm , zatímco pomocí mikroskopu asi 1 μm . Největší přesnost se dosahuje hmatem a to asi 1 μm . Pro hodnocení povrchu přejíždíme nehtem nebo hranou mince, kterou držíme v rukou, po testovaném materiálu. Na hmatová tělíska v ruce se při tom přenáší rytmické dráždění, na základě kterého klasifikujeme [6].

1.8.2 Nepřímé kvantitativní hodnocení

Existuje celá řada metod, na základě kterých se mikrogeometrie povrchu určuje mechanickými, pneumatickými, elektrickými či fotoelektrickými komparátory. Tyto přístroje můžeme rozdělit do dvou skupin a to na dílenské a laboratorní [5,6].

Přístroje dílenské - vyhodnocují úchylku profilu od obálky vrcholů profilu, která vznikne klouzáním patky velkého rádiusu po profilu. Relativní snímač nemá vlastní vedení. Tyto přístroje můžou vyhodnocovat pouze parametry z profilu drsnosti. Příklad dotykového drsnoměru je na obr. 6. Tento drsnoměr byl využit při našem měření drsnosti povrchu pro testované vzorky litiny a bronzu [5].

Přístroje laboratorní - snímač má přímé vedení, snímá profil absolutně, pomocí elektrické filtrace může vyhodnocovat všechny parametry struktury povrchu [5].



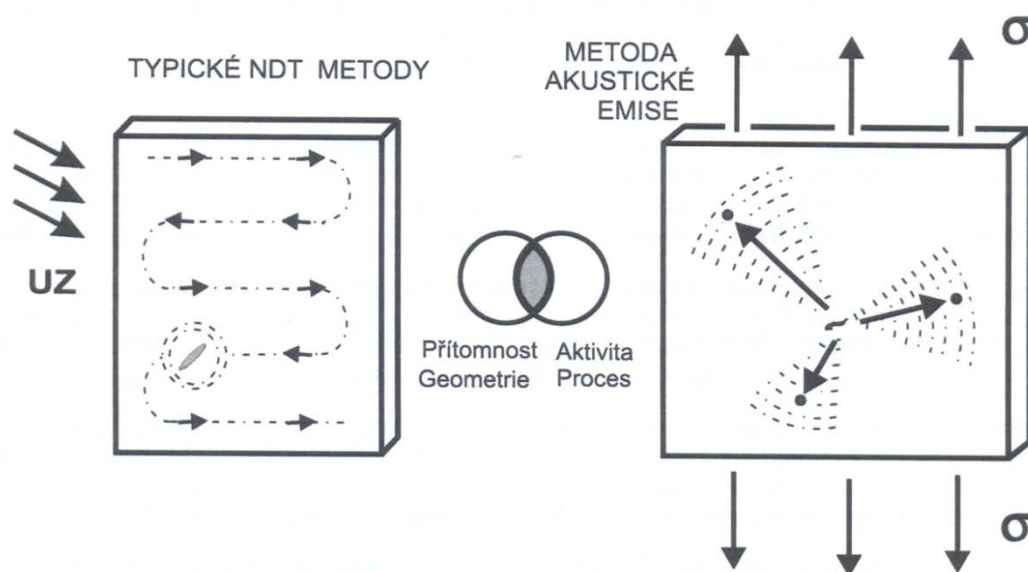
Obr. 6 Profiloměr Mitutoyo SurfTest SJ-210.

2 TEORIE AKUSTICKÉ EMISE

2.1 Základní charakteristiky AE jako NDT metody

Metodu akustické emise řadíme mezi nedestruktivní metody zkoušek materiálů, ačkoli se liší od klasických NDT metod. Odlišnost metody AE je diagnostika řady procesů, jež nemají s porušováním a defekty nic společného [2].

Metoda AE detekuje a charakterizuje rozvoj procesu. Pracuje s cílem odposlechu akustické aktivity emitované procesy probíhajícími v materiálu (plastické deformace, iniciace a rozvoje porušení, svírání a rozevírání trhlin, únik média přes průchozí trhlinu). Metoda AE detekuje, lokalizuje a hodnotí aktivitu porušení a defektů [2].



Obr. 7 Rozdíl mezi NDT metodami a AE [2].

Procesy jsou detekovány právě a pouze v průběhu rozvoje procesů - zdrojů AE. Řada procesů - zdrojů AE je nevratných, tzn., pokud v okamžiku rozvoje procesu - zdroje aktivitu AE nedetekujeme, zkoušku nelze v řadě případů zopakovat, je neopakovatelná. Metoda AE vyžaduje stimul rozvoje procesu - zdroje AE (plastické deformace resp. porušení - např. mechanické napětí σ) čímž se liší od klasických NDT metod viz obr. 7 [2].

Kontrola celé konstrukce či dané oblasti pomocí AE je zajištěna monitorováním sítí snímačů v rámci jedné zkoušky. Detekují se jak defekty vnější, vnitřní, tak i defekty v nepřístupném povrchu tělesa. K zajištění monitorování metoda AE nevyžaduje zpřístupnění kontrolované konstrukce zevnitř a pro měření postačí pouze vnější plocha [2].

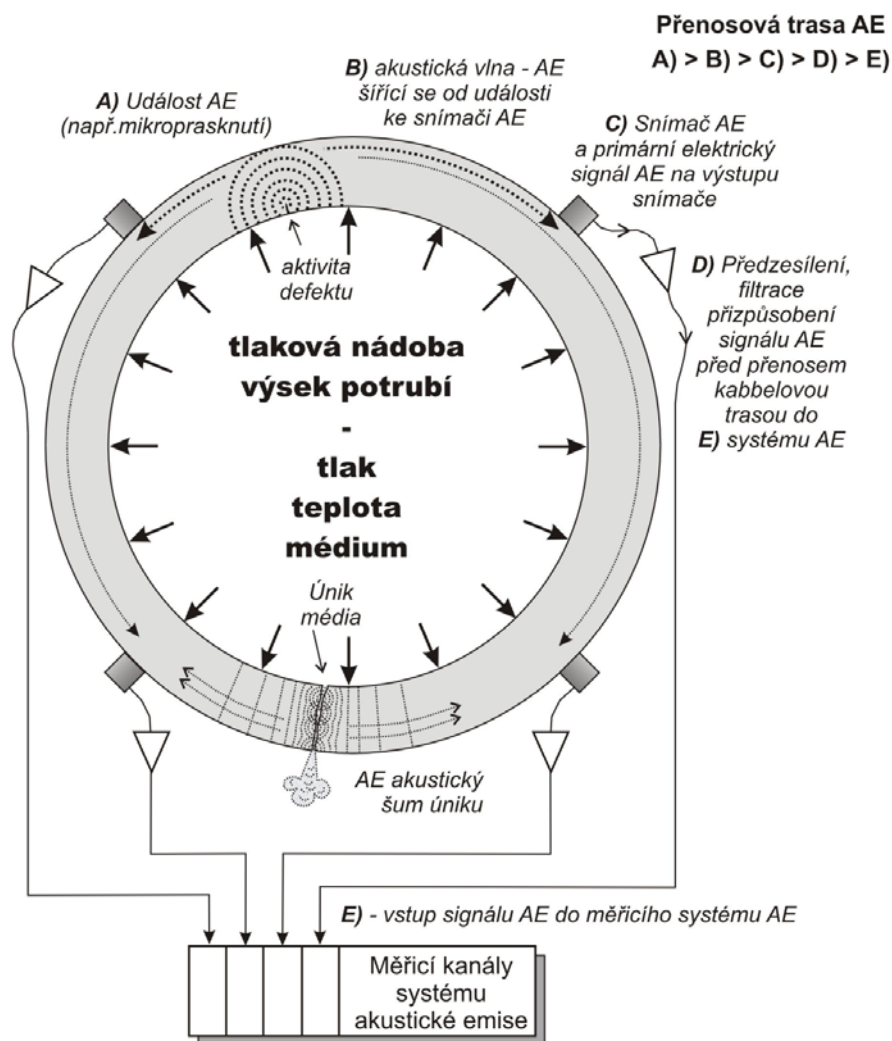
Metoda AE není univerzální. Efektivnost a přínos nasazení metody AE závisí výrazněji než u metod NDT na typu konstrukce, typu materiálu, režimu nasazení, na historii provozu a zatížení, na tom jaké mechanismy a procesy předpokládáme při zkoušce detekovat, v jakém režimu zatížení či provozu AE měříme, na podmínkách rušení apod [2].

V technické diagnostice má metoda akustické emise široké spektrum využití. Používá se při diagnostice rotujících objektů (tření a kavitace u ložisek, převodovek, atd.), při detekci a lokalizaci vznikajících mikrotrhin a jejich šíření, rozevírání a svírání ve stěnách tlakových nádob a potrubních systémů, u leteckých konstrukcí, u konstrukcí mostů apod. Dále je akustická emise používána při lokalizaci úniku tekutin z potrubí a zásobníků. Metoda akustické emise se také využívá při únavových materiálových zkouškách nebo destrukčních testech. Výhodou akustické emise oproti jiným defektoskopickým metodám je možnost kontinuálního monitorování a detekce řady dalších procesů, které iniciují vznik AE při nezanedbatelné úspoře času v porovnání s postupným testováním jinými metodami. Nevýhodou metody je, že příčinu vzniku akustické vlny přesně neznáme, neboť uvolněná energie je ovlivňována řadou faktorů jako je tvar a povrch tělesa, přenosová cesta vlny (funkce šíření akustické vlny) daná strukturou a homogenitou materiálu, aj. Další nevýhoda této metody je ve velké citlivosti měření. Tato citlivost za přítomnosti ať už mechanického nebo elektromagnetického rušivého zdroje může zapříčinit nepřesnost měření [1,2,3].

Metodou AE nazýváme metodu detekce akustické emise, následně elektronické zpracování detekovaného signálu AE a konečně též vyhodnocení parametrů detekovaného signálu AE. Základní schéma AE prezentuje obr. 8, který zobrazuje přenosovou trasu AE od zdroje k vyhodnocení parametrů signálu AE [2].

Přenosová trasa reprezentuje řetězec přenosů signálu-informace od zdroje, přes detekci až k vyhodnocení a lze ji rozdělit na několik fází [2]:

- událost zdroje AE, zdroj AE, mechanismus zdroje AE,
- šíření napěťových vln - akustické emise od zdroje k místu detekce snímačem AE,
- detekce napěťových vln snímačem AE na povrch tělesa - tzn. transformace AE na povrchu tělesa v místě snímače na elektrický signál AE,
- analogové zpracování a vedení elektrického signálu AE od snímače k vyhodnocení,
- vyhodnocení výsledného elektrického signálu AE měřicím systémem AE.

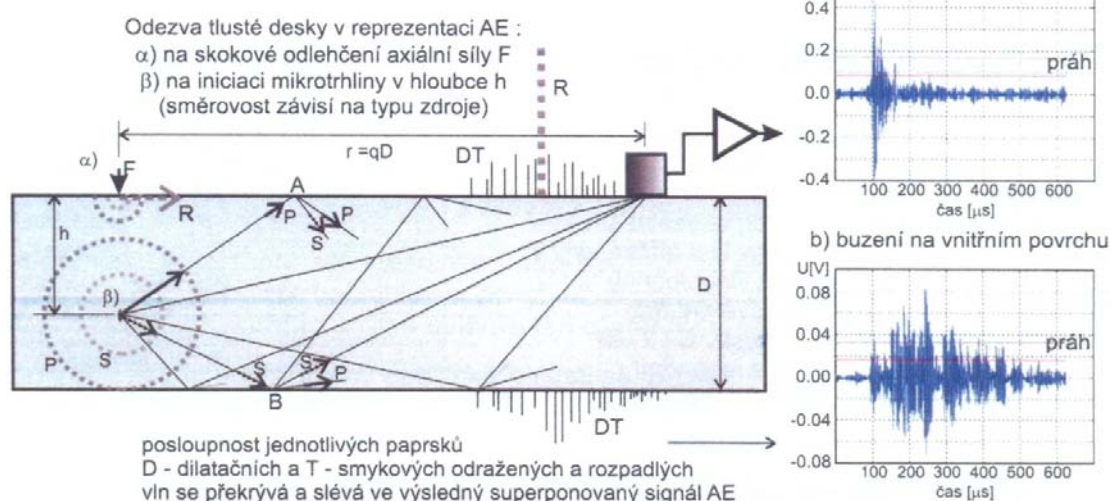


Obr. 8 Princip měření a přenosová trasa AE při měření tlakových nádob [2].

2.2 Fyzikální postata akustické emise

AE je fyzikální jev, při kterém plastickou deformací kovů doprovází akustické popraskávání či akustický šum emitovaný uvnitř materiálu v průběhu plastické deformace. K akustické emisi dochází ve zdroji akustické emise při uvolnění energie vlivem stimulace vnitřními nebo vnějšími silami. Událost akustické emise je emitována dislokačními a degradačními procesy v mikrostruktuře a makrostruktuře materiálu, kavitačními procesy v hydrodynamických systémech, turbulenci při úniku kapaliny z potrubí, degenerace dielektrika atd. Uvolněná energie se transformuje na mechanický napětový impuls šířící se materiálem jako elastická napětová podélná nebo příčná vlna. Metoda AE pracuje s frekvencemi řádu desítek až stovek kHz [1,2,3].

Akustická emise - překrývající se paprsky - 10^2 kHz.



Obr. 9 Princip snímání a zobrazení vln AE [2].

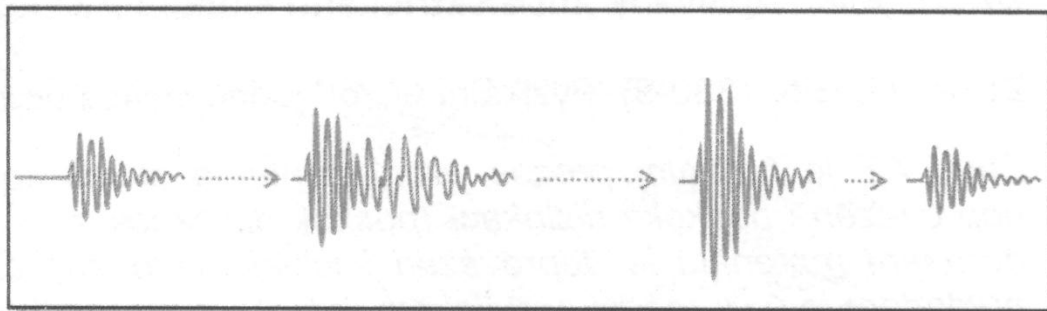
Jakmile vlna dopadne na rozhraní se vzduchem, tj. na povrch tělesa, částečně dochází k jejímu odrazu a částečně k její transformaci na jeden nebo více módů a vlna se dále šíří převážně povrchovou vlnou. Kromě povrchové vlny dochází také k transformaci např. deskové vlny. Je nutné připomenout, že jednotlivé typy vln se šíří různou rychlostí. Elektrický signál detekovaný na snímači akustické emise se označuje jako signál akustické emise. Složka vlny kolmá k povrchu tělesa je nejčastěji detekována širokopásmovým piezoelektrickým snímačem s rezonanční frekvencí nad měřeným spektrem akustické emise nebo citlivějším rezonančním senzorem s více rezoncemi. Volbou vhodného tlumení lze u rezonančních senzorů v úzkém pásmu nastavit vyrovnanou závislost citlivosti na kmitočtu. Tyto senzory se nesprávně označují jako úzkopásmové. U moderních provedení senzorů je v pouzdru zabudován předzesilovač. I když je energie vlny velmi malá, citlivé piezoelektrické senzory jsou schopné zaznamenat dislokace v materiálu v řádech 10^{-14} m. Pro co nejméně ztrátový přenos energie z povrchu tělesa do senzoru je nutné použít vazebního média (vazelína, olej, speciální emulze). Princip snímání AE můžeme vidět na obr. 9 [1].

2.3 Událost akustické emise

Dle názvosloví EN 1330-9 je událostí akustické emise nazýván fyzikální jev, který způsobuje vznik akustické emise. Událost AE reprezentuje jednotlivý fyzikální dynamický ráz, který iniciuje AE. Samotný zdroj AE, který generuje akustickou emisi, může být např. plastická deformace doprovázená poskoky dislokací. AE se dělí podle časových odstupů na nespojitou a spojitou [2].

2.4 Nespojitá akustická emise

Nespojitá (praskavá) AE viz obr. 10 je vyvolaná časově oddělenými událostmi trvajících od několika nanosekund do jednotek milisekund, čímž je jasně časově rozlišitelná. Spektrum impulzů je teoreticky frekvenčně velmi široké a signál je obvykle typu tlumených kmitů. Typickým zdrojem nespojité emise je aktivní, tj. měnící se trhlinka v materiálu [1,3].



Obr. 10 Průběh nespojité AE [2].

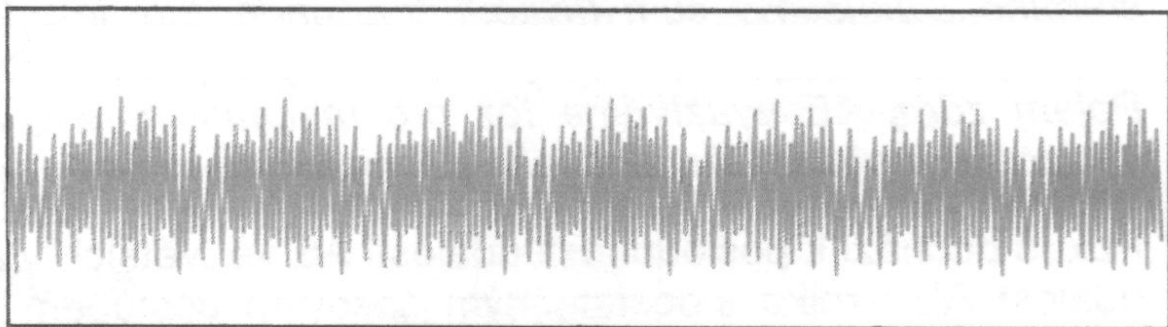
2.5 Spojitá akustické emise

Spojité signál AE je vyvolán událostmi, které nejsou časově oddělené, a může být generován řadou fyzikálních jevů. Z hlediska technické diagnostiky je to např. plastické deformace povrchu kovu při tření. Jednotlivé vlny se časově překrývají, sčítají, atd. a vzniká akustický šum [1].

Při vznikajících interferenčních různých složek vln včetně vln odražených a vlivem disperzních jevů má časový průběh vlny, a tedy i elektrického signálu z výstupu přiloženého senzoru náhodný charakter viz obr. 11 [1,2].

Při spojitě AE se vyhodnocuje [1,2]:

- střední hodnota, efektivní hodnota, maximální hodnota,
- amplitudová distribuční funkce,
- standardní odchylka, rozptyl, vyšší řády momentů,
- histogram amplitud,
- spektrální hustota výkonu,
- četnost překmitů přes prahovou úroveň,
- energie emisních událostí.

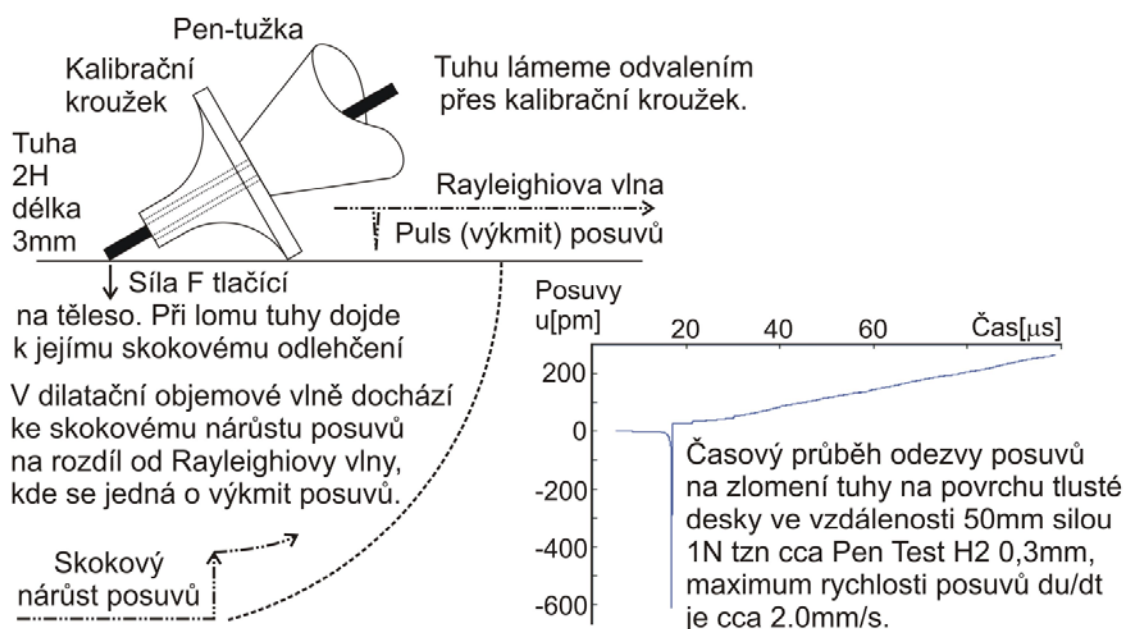


Obr. 11 Průběh spojitě AE [2].

2.6 Zdroj AE a jeho typy

Zdroj AE je fyzikální původ jedné či více událostí AE. Fyzikální proces, který generuje akustickou emisi, např. plastická deformace doprovázená poskoky dislokací, únik média pod tlakem apod. Existuje velké množství zdrojů AE, které lze detekovat snímačem nebo snímači. V praxi se jako základní kalibrační testy pro zjištění signálu AE používají: Pen-test nebo klepnutí tyče o povrch materiálu [2,3].

Při použití metody Pen-test dochází ke zlomení tuhy a tím k náhlému skokovému odlehčení síly kolmo tlačící na povrch desky. Velikost síly se liší podle délky použité tuhy v rozmezí od 0,8 až 1 N pro tuhu 2H délky 0,3mm a 2,2 až 2,7 N pro tuhu 2H délky 0,5 mm. Pen-Test generuje ostrý puls AE se všemi frekvencemi zastoupenými rovnoměrně spolehlivě nad 1 MHz. Princip spočívá ve zlomení tuhy mikrotužky pomocí kalibračního teflonového kroužku o povrch testovaného tělesa, kdy v lomu dojde k jejímu skokovému odlehčení viz obr. 12 [2].



Obr. 12 Princip zkoušky Pen-Test [2].

2.7 Klepnutí tyče do povrchu materiálu

Oproti Pen-Testu je klepání či házení kuličky nevhodným kalibračním zdrojem AE. Výhodou této metody je rychlé vybudování signálu. Princip spočívá v klepnutí tyčky průměru 5 mm se zakulaceným čelem do kovové desky. Tím dojde k působení kolmé síly na povrch tělesa. Doba nárůstu síly bude cca několik milisekund. Hlavní část energie bude soustředěna ve frekvencích do 1 kHz a následný tvar pulzu závisí na tvrdosti materiálu [2].

2.8 Detekce a měřicí trasa elektrického signálu AE

Měřicí trasu pro detekci AE tvoří několik základních členů: snímač AE, předzesilovač AE, kabelová trasa AE, závěrečná úprava el. signálu v měřicím systému, vyhodnocení a ukládání dat pomocí patřičného softwaru [2].

2.9 Snímače AE

2.9.1 Piezoelektrické snímače

Jsou to typické snímače AE využívající k detekci AE vlny piezoelektrické elementy - piezoelementy. Jejich deformací při průchodu vlny vzniká na elektrodách vysunutí náboje a tím napětí. Toto napětí je nadále přenášeno co nejkratší vzdáleností na vstup předzesilovače pro jeho zesílení a přizpůsobení dalšímu přenosu a zpracování. Předzesilovač bývá umístěn maximálně několik metrů od snímače. Často však bývá přímo součástí snímače [3].

2.9.2 Rezonanční a širokopásmové snímače

Kvůli požadavkům na vysokou citlivost se v praxi setkáváme s rezonančními nezatlumenými snímači. Snímače AE využívají obvykle rezonanční frekvenci vázanou na příčně radiální kmity válcové destičky piezoelementu. Tato frekvence pak určuje frekvenci a frekvenční pásmo měření a tím řadu důležitých charakteristik měření [3].

Vyšší citlivost rezonančních snímačů AE znamená, že se zvýrazňuje citlivost dominantně na jedné rezonanční frekvenci. Pokud toto zvýraznění potlačíme, potlačíme jeho rezonanční citlivost, ale získáme širokopásmový snímač AE, jež detekuje budící akustický signál AE v širokém frekvenčním spektru s relativně stejnou citlivostí, reprodukuje věrněji časový průběh budícího pulsu AE a snímač nerozkládá [2].

2.9.3 Instalace snímačů

Snímač AE tvoří s povrchem zkoušeného tělesa elektromechanickou soustavu navázanou mechanicky na těleso. Existují dva způsoby instalace snímačů AE na těleso nebo konstrukci a to přímá instalace nebo instalace přes akustický vlnovod [2].

2.9.4 Přímá instalace snímače

Tento způsob spočívá v přitlačení čela snímače na povrch tělesa pomocí vazebního prostředí (obvykle vazelína), které nám vyplní prázdný prostor mezi nerovnostmi ploch. Na citlivost akustického snímače má významný vliv hladkost a rovinnost povrchu. Hodnoty drsnosti a rovinnosti povrchu by měly být přibližně stejné jako na snímači pro dosažení co nejpřesnějšího měření. Instalace snímače na hrubý či nerovný povrch výrazně snižuje citlivost, stejně tak jako případná instalace snímače na povrch tělesa přes barvu či korozní vrstvu [2,3].

2.9.5 Instalace snímačů přes vlnovod

Pokud je povrch tělesa pro přímou instalaci snímače nevhodný nebo ji vůbec neumožňuje, využívá se instalace přes vlnovod. Vlnovod je tenká tyč s rozšířeným koncem, na který se nainstaluje snímač AE. Nejtypičtějším příkladem instalace snímačů přes vlnovod je ten, kdy je povrch tělesa horký a neumožňuje přímou instalaci snímače na povrch, využívá se tedy přivaření nebo přiložení akustického vlnovodu. Snímače se zvýšenou teplotní odolností můžou pracovat až do teplot 150 °C. Při použití vlnovodu musíme počítat s poklesem citlivosti. Oproti přímé instalaci bývá signál snižován o cca 14 dB (10 až 20 dB) [2,3].

2.9.6 Kalibrace snímačů

Před každým měřením AE by měla být vždy provedena kalibrace citlivosti instalovaných snímačů AE. Snímač AE převádí mechanické elastické vlny z povrchu tělesa na elektrický signál. Kalibrace znamená určení parametrů výstupního elektrického signálu vůči definovanému mechanickému buzení snímače. Rozlišují se dva druhy kalibrace a to relativní a absolutní [2].

Relativní kalibrace spočítá v porovnání odezvy různých snímačů v různých časech (např. recalibrace po 2 letech provozu), kdy se porovnávají buď pouze rozdíly citlivosti v podobě maxima amplitudy jako odezvy např. PenTest nebo komplexnější, kdy se porovnávají rozdíly frekvenční odezvy na stejný budící zdroj AE. Při této kalibraci se snímače vzájemně mezi sebou porovnávají bez znalosti velikosti a průběhu budících mechanických veličin na vstupu snímače (buzení musí být totožné) [2].

Absolutní kalibrace má jako hlavní úkol výběr vhodné volby mechanického buzení. Tato kalibrace znamená poměr změřené odezvy elektrického napětí ve Voltech na buzení v metrech nebo Pascalech. Problém je v tom, že buzení není jedno číslo v metrech, ale časový průběh výstupního elektrického napětí. Cílem je vytvořit na vstupu snímače aproximaci ostrého δ pulsu [2,3].

2.10 Předzesilovače AE

V praxi se můžeme setkat s případy, kdy dosahovaná délka přenosu signálu mezi snímačem a analyzátozem signálu dosahuje až stovky metrů (při těchto délkách kabelů je nutné zvážit, zda se nemůže na kabel navázat např. elektromagnetické rušení). Signál na elektrodách piezoelementu je slabý jak co do napětí, tak co do indukovaného náboje, proto se buď přímo ve snímači, nebo v blízkosti snímače využívá předzesilovač. Předzesilovač primární signál ze snímače zesílí, provede základní frekvenční filtraci a přizpůsobí signál impedančně kabelu. Předzesilovač může také plnit funkci v rámci diagnostiky snímače resp. celé měřicí trasy od snímače po měřicí systém AE [2,3].

2.11 Kabelové trasy

Po úpravě elektrického signálu AE v předzesilovači je signál veden kabelovou trasou k měřicímu systému. Kabel by měl signál přenést pokud možno beze ztrát a deformací. Na kabelové trase může docházet k elektromagnetickému rušení. U kabelů délek stovek metrů musíme počítat s jistým útlumem signálu, který se postupně s rostoucí délkou začíná projevovat od vyšších frekvencí [3].

2.12 Vyhodnocení akustické emise

Jedná se o digitalizaci signálu a následného zpracování signálním procesorem. Existuje několik různých úrovní vyhodnocení signálu. Čím více poroste počet měřících kanálů a úrovně vyhodnocení signálu tím vyšší bude cena měřicí techniky, porostou požadavky na vyhodnocovací software a na specifické podmínky pro měření a jeho provedení [3].

2.12.1 Informativní úroveň

V této úrovni nás zajímá pouze přítomnost, aktivita AE (počet hitů, počet událostí AE za čas, apod.) resp. intenzita (amplituda signálu AE) detekovaného signálu. Jedná se

o vlastní přítomnost, začátek či konec aktivity AE obvykle ve vazbě na významné externí faktory související s monitorovaným procesem AE [2,3].

2.12.2 Standardní úroveň

Při této úrovni vyhodnocujeme základní, typické parametry výsledného signálu AE. Standardní úroveň hodnotí parametry v časové reprezentaci a vychází ze signálu rezonančního snímače. Vyhodnocujeme energii RMS signálu. Tato úroveň je dostačující pro naše experimentální měření [3].

2.12.3 Pokročilá úroveň

Jedná se o špičkové vyhodnocení plně digitalizovaného signálu AE. Používá se především pro vyhodnocení frekvenčně širokopásmového signálu. Tato úroveň je poměrně matematicky náročná a s tím jsou spjaty i nároky na výpočetní techniku [2,3].

2.13 Základní parametry spojitého signálu

Základní charakteristikou spojitého signálu je trvalý pomalu se měnící signál charakteru šumu. Parametry spojitého signálu vyhodnocujeme jako střední parametry ze zvoleného časového intervalu [2]. Nejčastěji se jedná o následující základní charakteristiky [2]:

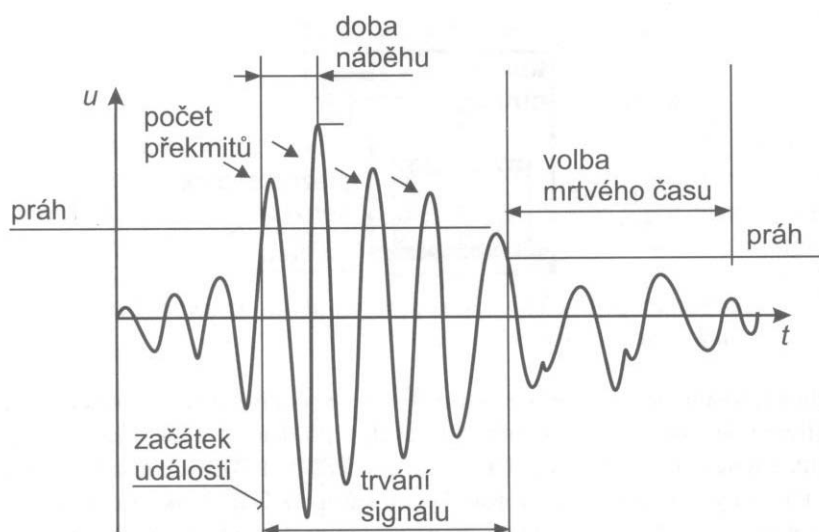
- RMS - efektivní hodnota charakterizující energii, resp. výkon signálu,
- ASL - střední úroveň absolutní hodnoty úrovně signálu,
- počet překmitů nad danou prahovou úroveň - jedná se o počet překmitů signálu přes danou prahovou úroveň za daný časový úsek,
- frekvenční spektrum signálu - je zde několik způsobů charakterizujících frekvenci spojitě AE např. hrubý odhad, který poskytuje počet překmitů, měření úrovně RMS signálu apod.

2.14 Popis nespojitého signálu

V případě nespojitého signálu AE se detekují jednorázové krátkodobé časově výrazné nárůsty, které se nazývají hity signálu AE viz obr. 13. Tyto hity posléze ze signálu vybíráme a vyhodnocujeme je samostatně [2].

Při zpracování nespojitého impulzního signálu AE se vyhodnocuje [2]:

- četnost nespojitě emise, tj. počet událostí akustické emise za časový interval,
- počet překmitů nebo četnost překmitů přes zvolenou prahovou úroveň,
- čas prvního překročení překmitů přes zvolenou prahovou úroveň,
- čas prvního překročení prahu,
- maximální hodnota signálu,
- doba trvání události,
- doba náběhu definovaná jako doba od překročení prahové úrovně do dosažení maximální amplitudy signálu,
- amplitudové spektrum signálu,
- deformace tvaru impulzu pomocí časově frekvenčnímu popisu,
- energie impulzu.



Obr. 13 Parametry nespojitého signálu AE (u určuje velikost amplitudy, t udává čas) [1].

2.15 Vícekanálové měření

V praxi se setkáváme s vícekanálovými měřeními, kdy je monitorovaný objekt osazen současně souvislou sítí více snímačů AE. Znamená to, že jeden a týž proces monitorujeme současně více snímači, měřicími kanály [2].

Detekce ve více místech poskytuje nové informace pro vyhodnocení zdroje, původu detekované AE. Mimo jiné umožňuje orientační nebo i přesnou lokalizaci zdroje - lokalizaci původu detekované AE [2].

Vícekanálová měření by měla splňovat následující podmínku. Měřicí trasy by měly být pokud možno shodné, nevnašet další rozdíly do signálu nad rozdíly dané šířením elastických napětíových vln. Což znamená shodné snímače, shodné vlnovody, shodné měřicí kanály, shodné frekvenční pásmo měření...[2]. Detekce v různých místech měřicí sítě vede k [2]:

- časovým rozdílům příchodů hitu dané události AE do různých snímačů sítě,
- rozdílům v intenzitě signálu detekovaného v různých snímačích sítě,
- rozdílům doby trvání či náběhu v důsledku rozmazání a disperze vln pulsu AE,
- detailnějším změnám průběhu digitalizovaného signálu AE v různých místech sítě.

3 PRAKTICKÁ ČÁST

3.1 Cíl práce, vědecká otázka a pracovní hypotéza

Cílem práce bylo stanovit změny parametrů signálu akustické emise při kontaktu pohybujícího se pístního kroužku s povrchem zkušební tyče užitím zařízení Dakel Xedo a stávajícího přípravku pro kontaktní zkoušky. Měření mělo být provedeno za použití nejméně dvou vybraných materiálů, každý s různou texturou povrchu.

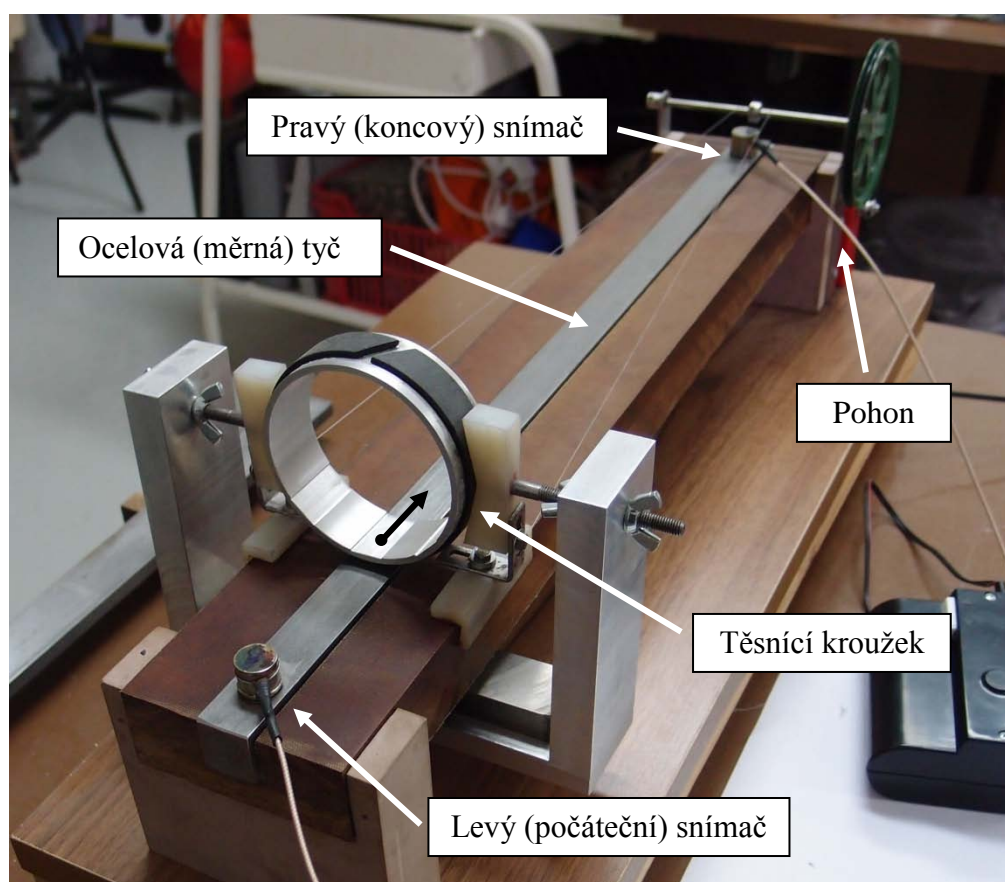
Mimo těsnící kroužek, byly pro náš experiment použity dva kovové vzorky, každý se čtyřmi stranami o různé drsnosti. Tyto vzorky byly taženy po stabilní ocelové tyči, na které se využívaly dvě strany o různých drsnostech.

Tato práce by měla posloužit jako základ pro rozsáhlejší výzkum v oblasti NDT, který by mohl přispět k rozšíření aplikace metody AE pro zjišťování stupně opotřebení jednotlivých materiálů u pneumatických nebo hydraulických prvků a to zejména v energetickém průmyslu.

3.2 Průběh měření

Měření bylo realizováno na přípravku uzpůsobenému k našemu pokusu, tento přípravek je opatřen elektromotorem, který navíjel silonové vlákno, za které byly upnuty kovové vzorky nebo těsnící kroužek. Signál AE se při měření snímal ze dvou snímačů AE (Dakel typ MDK 13 AS) současně. Výstupní signál ze snímačů byl zpracováván v analyzátoru AE Dakel Xedo se standardním vyhodnocovacím software DeaMon a DaeShow. Oba dva snímače byly umístěny na obou okrajích zkušební ocelové tyče viz obr. 14, přibližně jeden centimetr od kraje. Po této tyči se pohyboval vzorek na dráze dlouhé 350 mm. Celková průměrná doba trvání jednoho měření byla 25 s. Z důvodu snížení nežádoucích šumů, které vznikaly při přechodu vzorku z klidu do pohybu a naopak, byly odstraněny 4 s. ze začátku a konce měření. Výsledných 17 s nám vyhovovalo pro vyhodnocení a porovnání jednotlivých kombinací měřených vzorků. K omezení náhodných jevů ovlivňujících signál AE jsme pro každou sérii měřených povrchů provedly deset měření pro jednu kombinaci ploch při styku vzorků na sucho a stejný počet měření pro vzorky měřené za použití maziva. Z důvodů porovnání naměřených hodnot byla pro všechna měření nastavena stejná konfigurace pro oba dva snímače.

Nejdříve se měřil RMS signál při kontaktu těsnícího kroužku s dvěma různými povrchy ocelové tyče. První série měření probíhaly na sucho, následně se měření opakovala za použití vrstvy oleje M6AD. Olej se po několika měřeních doplňoval na ocelovou tyč z důvodu roztírání vrstvy. Po domluvě s vedoucím práce byl experiment rozšířen o měření vzorků vyrobených z šedé litiny a bronzů, kde se zjišťovala hodnota RMS signálu obdobným způsobem jako u těsnícího kroužku na suchém i na mazaném povrchu ocelové tyče.



Obr. 14 Přípravek pro měření vlivu struktury povrchu na signálu AE

3.3 Sledované parametry

Při měření AE lze sledovat více hodnot, mezi námi sledované parametry patřily hodnoty RMS signálu. Tento parametr byl vybrán z důvodu efektivního hodnocení charakterizující energii, resp. výkon signálu za určitý časový úsek, což v našem případě znamenalo dobu, za kterou vzorek urazil dráhu po ocelové tyči. Z každého měření byly vyexportovány průměrné hodnoty signálu pro každý snímač zvlášť. Ze všech měření se spočítaly průměrné hodnoty a určila se nejmenší a největší hodnota pro zobrazení rozsahů. Výsledné hodnoty byly zaneseny do grafů, kde se porovnávaly v závislosti na drsnosti jednotlivých vzorků a na závislosti vůči těsnicímu kroužku.

3.4 Materiály a metody

Pro všechna měření byla nastavená jednotná konfigurace měřicího systému Dakel. Bylo nastaveno zesílení 40 dB a interval měření 100 ms.

Pro náš experiment byl využit přípravek pro měření změny signálu AE různě opotřebovaných těsnicích kroužků, vyvinutých v ÚK FSI (Apollo ID: 26339, G - funkční vzorek, 2012), který můžete vidět na obr. 15.



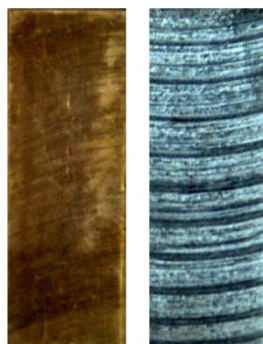
Obr. 15 Uchycení kovového vzorku v přípravku.

Pro následující měření byla pohyblivá část přípravku s upínacím zařízením pro upnutí zkoušeného těsnícího kroužku nahrazena kovovými vzorky ve tvaru kvádrů o rozměrech 20 x 20 x 50 mm, které byly pomocí silonového vlákna spojeny s navíjecím zařízením, které bylo poháněno elektromotorem. Vzorky pro naše měření byly vyrobeny z šedé litiny a bronzu.

Konkrétně se jednalo o šedou litinu s lupínkovým grafitem ČSN 42 2425 - jejichž struktura je tvořena perlitem (s malým množstvím feritu) s lupínkovým grafitem. Tato litina je vhodná pro odlitky součástí turbín, ozubených kol, značně namáhaných strojních součástí například u servomotorů jako těleso pístu, apod. Tvrdost max 240 HB, pevnost v tahu max. 250 MPa.

Dalším materiálem byl bronz - slitina mědi na odlitky CuSn12 - slitina mědi s cínem. Vhodná pro součásti vystavené tření při menších rychlostech (než 5 m/s) nebo velkému dynamickému zatížení pro teploty 120 - 150 °C, na velmi namáhané součásti. Nejvyšší tvrdost 80 HB, nejvyšší pevnost v tahu 240 MPa. Plochu vzorku s drsností 3,91 μm můžeme vidět na obr. 16.

Dosedací plochy vzorků byly obrobeny s různými úrovněmi textury (drsnosti) povrchu. Také použita ocelová tyč o délce 500 mm, po které se vzorky pohybovaly, má povrchy s různými hodnotami Ra.



Obr. 16 Stopy po nástroji u bronzového vzorku (vlevo) a litinového vzorku (vpravo).

4 VÝSLEDKY MĚŘENÍ

V této části jsou uvedeny výsledky z experimentálního měření. V tabulkách jsou kvůli přehlednosti uvedeny již upravené hodnoty ze snímačů. Grafy obsahují rozptýly hodnot a jsou spojeny úsečkou, která propojuje průměry jednotlivých měření.

4.1 Použitý vzorek - těsnící kroužek

Jako první se prováděly měření na těsnícím kroužku umístěném na speciálním přípravku. Hodnoty naměřeného RMS signálu jsou uvedeny níže v tabulkách.

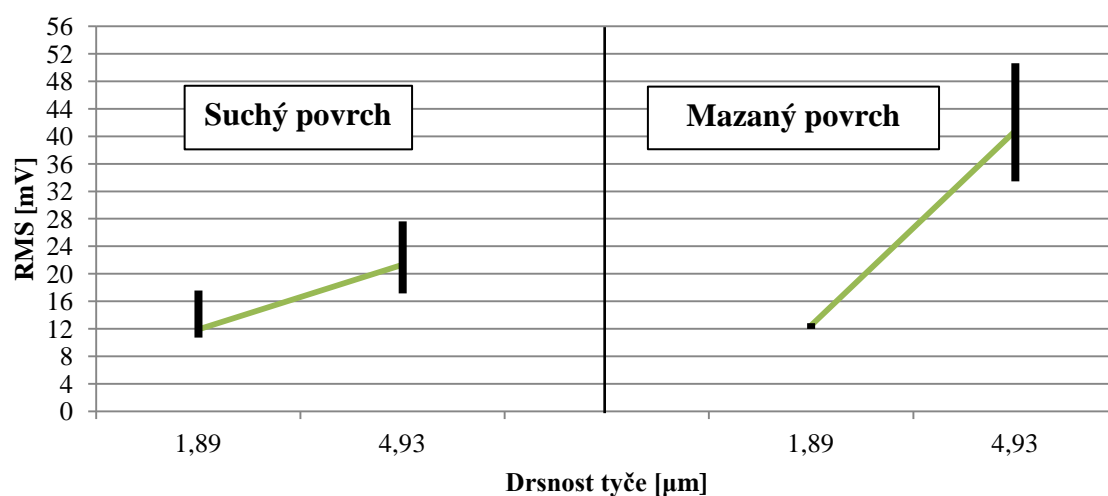
Tab 1.1 Hodnoty RMS signálu při tření těsnícího kroužku s ocelovou tyčí pro levý snímač.

Měření kroužku			
Levý snímač			
Drsnost tyče [μm] - typ vzorku	Největší hodnota RMS signálu [mV]	Nejmenší hodnota RMS signálu [mV]	Průměrná hodnota RMS signálu [mV]
Suchý povrch			
1,89 - kroužek	17,547	10,726	11,928
4,93 - kroužek	27,600	17,166	21,310
Mazaný povrch			
1,89 - kroužek	12,802	11,996	12,487
4,93 - kroužek	50,622	33,445	40,809

Tab 1.2 Hodnoty RMS signálu při tření těsnícího kroužku s ocelovou tyčí pro pravý snímač.

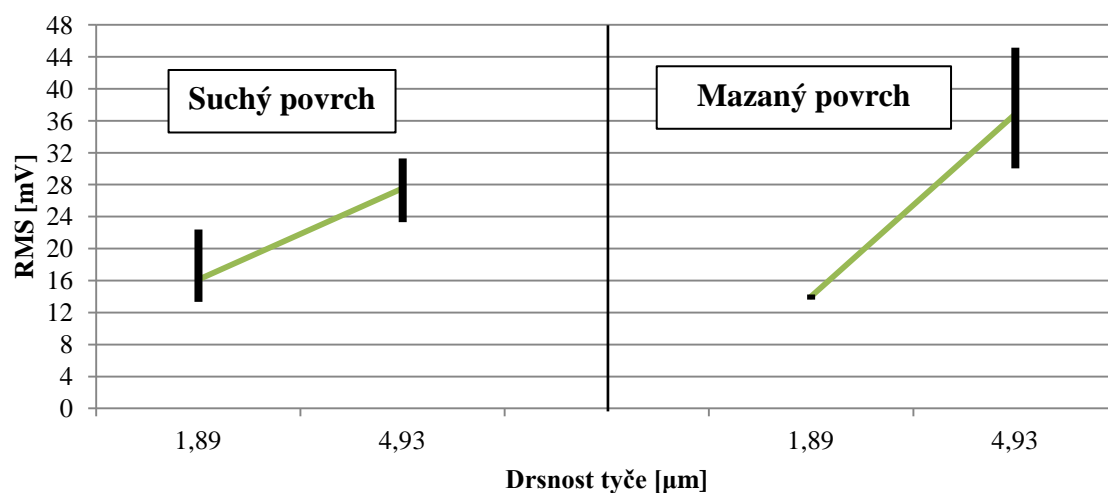
Měření kroužku			
Pravý snímač			
Drsnost tyče [μm] - typ vzorku	Největší hodnota RMS signálu [mV]	Nejmenší hodnota RMS signálu [mV]	Průměrná hodnota RMS signálu [mV]
Suchý povrch			
1,89 - kroužek	22,369	13,349	16,117
4,93 - kroužek	31,297	23,305	27,549
Mazaný povrch			
1,89 - kroužek	14,250	13,615	14,005
4,93 - kroužek	45,125	30,027	36,867

Těsnící kroužek vs. ocel - levý snímač



Obr. 17 Změna hodnot RMS signálu AE naměřeného na levém snímači při měření - těsnící kroužek vs. povrch měřené tyče s drsnosti 1,89 a 4,93 μm . Vlevo suchý povrch a při mazaném povrchu vpravo.

Těsnící kroužek vs. ocel - pravý snímač



Obr. 18 Změna hodnot RMS signálu AE naměřeného na pravém snímači při měření - těsnící kroužek vs. povrch měřené tyče o drsnosti 1,89 a 4,93 μm . Vlevo suchý povrch a při mazaném povrchu vpravo.

Z tabulek 1.1 a 1.2 můžeme vypořadovat, že pravý koncový snímač naměřil hodnoty o něco menší než levý snímač, který měřil hodnotu na startu dráhy vzorku. Tato menší

nepřesnost může být způsobena více vlivy především rozdílností snímačů a dalšími jako směrem dráhy vzorku, menšími vadami materiálu ocelové tyče, po které se vzorky pohybovaly apod. Důležité jsou ovšem hodnoty signálů RMS, kdy na obr. 17 a obr. 18 můžeme vidět jasné zvýšení signálu při zdrsnění povrchu. K největším hodnotám signálu dochází při kontaktu nejdrsnější straně ocelové tyče s těsnicím kroužkem při použití maziva.

4.2 Použitý vzorek - šedá litina

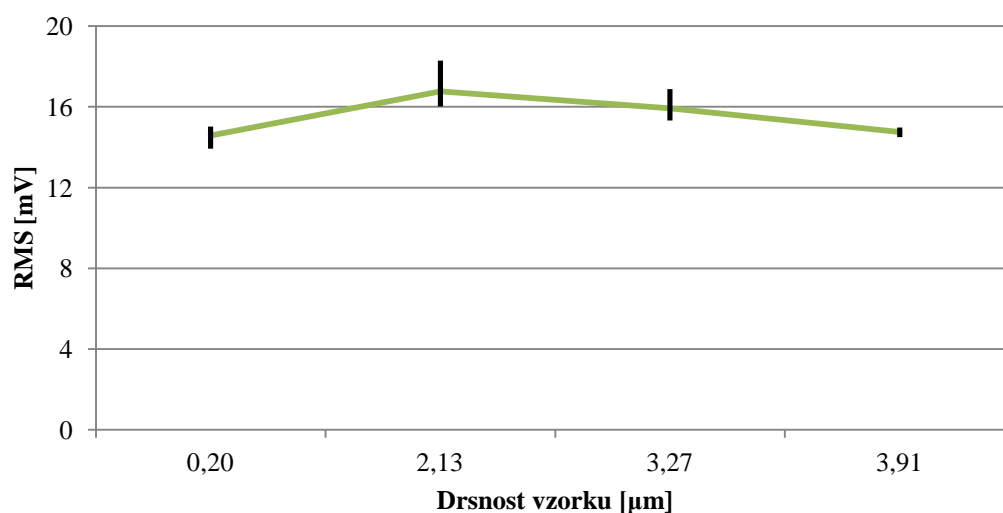
Druhým zkoumaným vzorkem byla šedá litina. Jelikož se hodnoty obou snímačů prakticky shodovaly, uvádím pouze hodnoty z levého počátečního snímače.

4.2.1 Výsledky z měření na suchém povrchu tyče

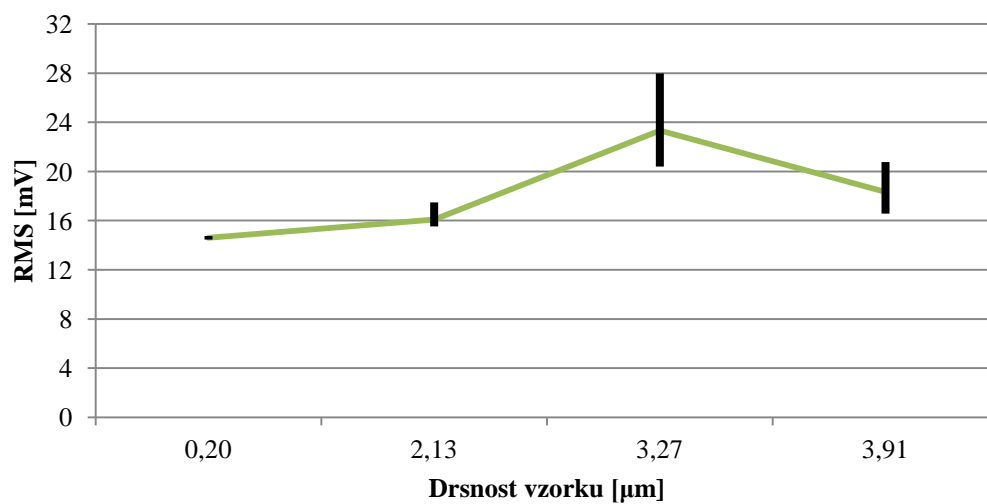
Tab 2.1 Hodnoty RMS signálu při použití různých povrchů šedé litiny měřené na suchém povrchu ocelové tyče.

Měření litinového vzorku			
Levý snímač			
Drsnost tyče - drsnost vzorku [μm]	Největší hodnota RMS signálu [mV]	Nejmenší hodnota RMS signálu [mV]	Průměrná hodnota RMS signálu [mV]
1,89 - 0,20	15,019	13,931	14,579
1,89 - 2,13	18,289	16,025	16,772
1,89 - 3,27	16,885	15,318	15,932
1,89 - 3,91	14,974	14,497	14,745
4,93 - 0,20	14,739	14,461	14,595
4,93 - 2,13	17,481	15,533	16,098
4,93 - 3,27	27,978	20,397	23,331
4,93 - 3,91	20,767	16,572	18,335

Pokud si porovnáme rozptyly jednotlivých naměřených hodnoty z tab. 2.1 zjistíme, že největší rozptyl mají hodnoty pro drsnosti 4,93 - 3,27 μm , která má i největší průměrnou hodnotu RMS signálu. Jak je dále patrné na obr. 20 nejvyšší hodnota drsnosti vzorku vykazuje menší hodnoty signálu. Odchýlení může být způsobeno sníženým emitováním AE, kdy drsnost dosáhla určitého bodu a její povrch se nestýká v tolika bodech s ocelovou tyčí jako u vzorku s nižší drsností povrchu. Tento trend nám potvrzuje i tvar křivky průměrných hodnot měřených na tyči o drsnosti 1,89 μm viz obr 19.

Šedá litina vs. ocel Ra 1,89 μm , suchý povrch - levý snímač

Obr. 19 Změna hodnoty RMS signálu AE - šedá litina vs. ocel při použití na suchém povrchu, Ra tyče 1,89 μm , hodnoty uvedeny z levého snímače.

Šedá litina vs. ocel Ra 4,93 μm , suchý povrch - levý snímač

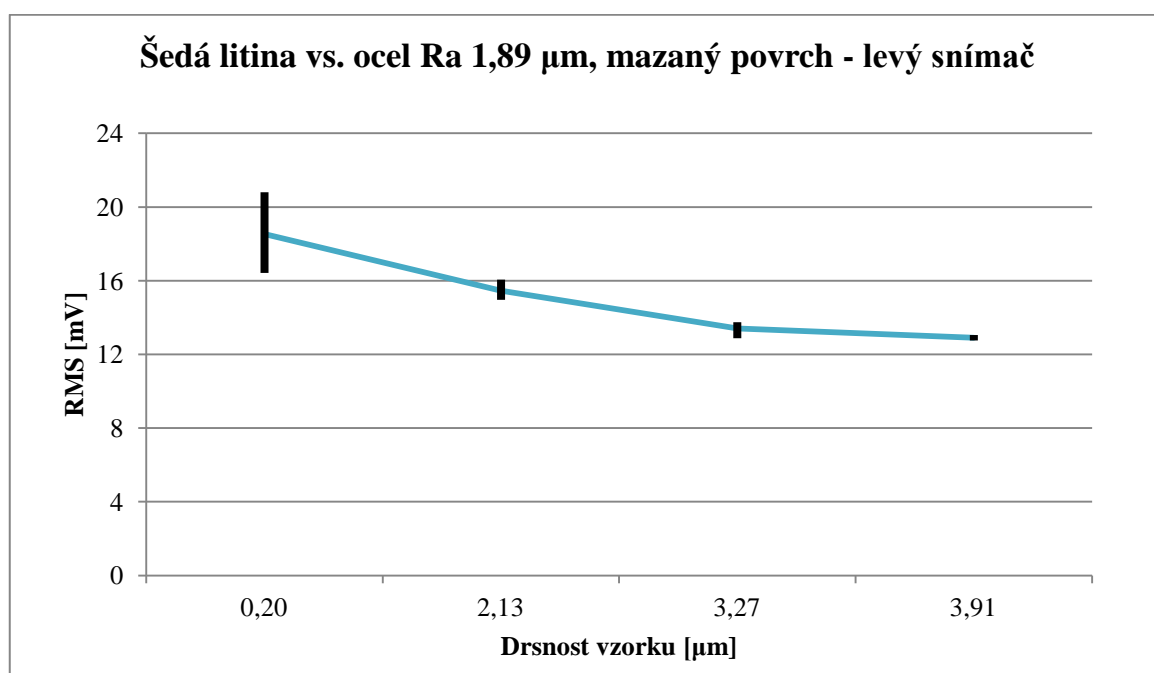
Obr. 20 Změna hodnoty RMS signálu AE - šedá litina vs. ocel při použití na suchém povrchu, Ra tyče 4,93 μm , hodnoty uvedeny z levého snímače.

4.2.2 Výsledky měření na mazaném povrchu

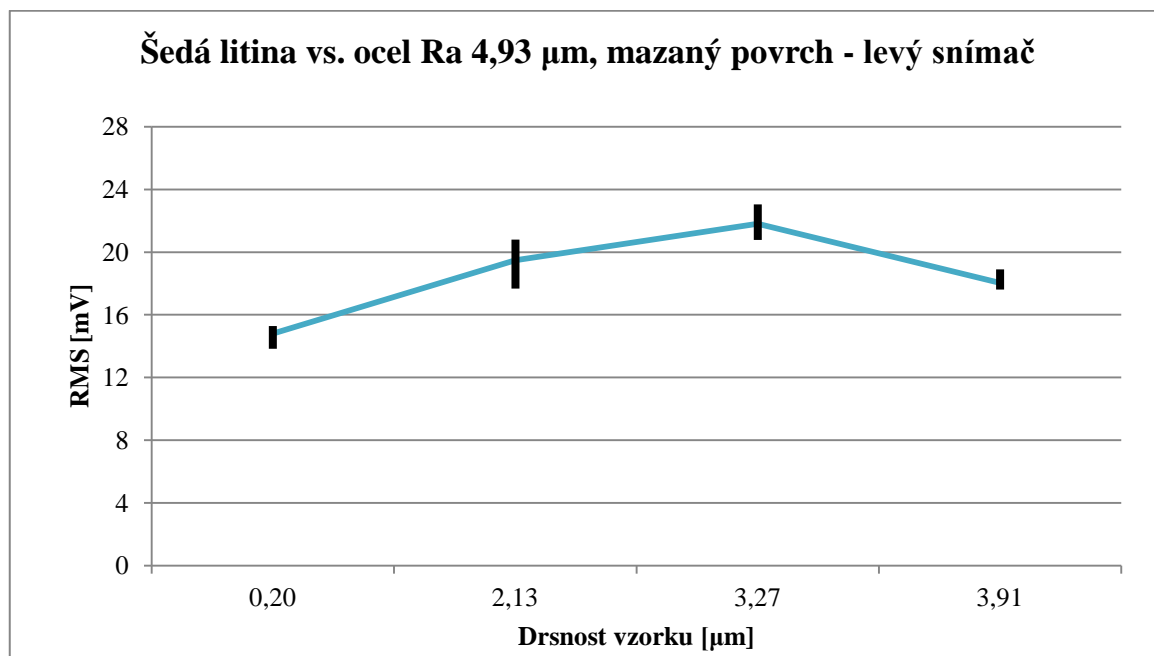
Tab. 2.2 Hodnoty RMS signálu při použití různých povrchů šedé litiny měřené na mazaném povrchu ocelové tyče.

Měření litinového vzorku			
Levý snímač			
Drsnost tyče - drsnost vzorku [μm]	Největší hodnota RMS signálu [mV]	Nejmenší hodnota RMS signálu [mV]	Průměrná hodnota RMS signálu [mV]
1,89 - 0,20	20,804	16,419	18,540
1,89 - 2,13	16,052	14,964	15,453
1,89 - 3,27	13,737	12,868	13,411
1,89 - 3,91	13,052	12,756	12,900
4,93 - 0,20	15,292	13,837	14,803
4,93 - 2,13	20,803	17,683	19,471
4,93 - 3,27	23,035	20,78	21,814
4,93 - 3,91	18,889	17,603	18,027

Z tab. 2.2 lze vyčíst, že největší rozptyl RMS signálu je u drsností 1,89 - 0,20 μm a zároveň byla při tomto měření naměřena i největší průměrná hodnota signálu při použití ocelové tyče 1,89 μm . Při porovnání grafů na obr. 21 a obr. 22 je patrný jasný rozdíl tvaru v křivkách propojených průměrných hodnot. Při použití drsnější strany ocelové tyče je průběh obdobný jako na nemazaném povrchu, ale na straně s drsností 1,89 μm má křivka spíše klesající tendenci s postupně narůstající drsností litinového vzorku.



Obr. 21 Změna hodnoty RMS signálu AE - šedá litina vs. ocel při použití na mazaném povrchu, Ra tyče 1,89 μm , hodnoty uvedeny z levého snímače.



Obr. 22 Změna hodnoty RMS signálu AE - šedá litina vs. ocel při použití na mazaném povrchu, Ra tyče 4,93 μm , hodnoty uvedeny z levého snímače.

4.3 Použitý vzorek - bronz

Jako třetí byl k našemu experimentu použit bronzový vzorek. V tomto měření se hodnoty levého a pravého snímače mírně lišily, což mohlo být způsobeno i citlivostí jednotlivých snímačů.

4.3.1 Výsledky z měření na suchém povrchu tyče

Tab. 3.1 Hodnoty RMS signálu z levého počátečního snímače při použití různých povrchů bronzového vzorku měřených na suchém povrchu ocelové tyče.

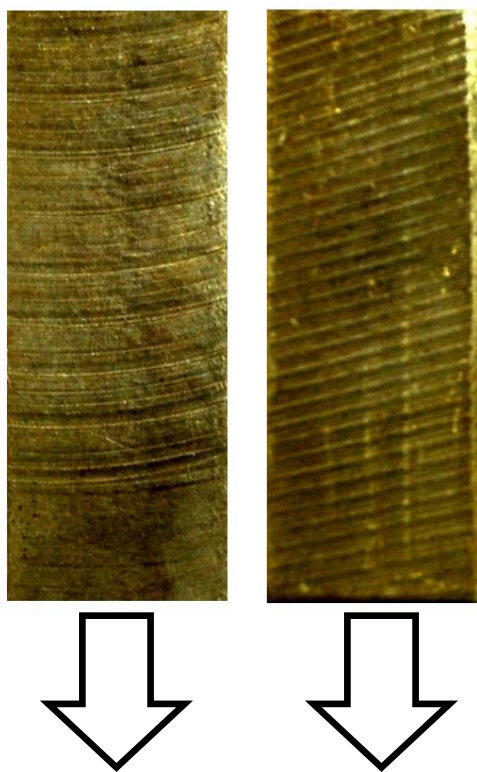
Měření bronzového vzorku			
Levý snímač			
Drsnost tyče - drsnost vzorku [μm]	Největší hodnota RMS signálu [mV]	Nejmenší hodnota RMS signálu [mV]	Průměrná hodnota RMS signálu [mV]
1,89 - 0,35	19,520	17,864	18,749
1,89 - 0,42	33,034	21,998	26,547
1,89 - 1,37	29,490	21,134	24,913
1,89 - 4,20	22,664	17,855	19,942
4,93 - 0,35	17,500	15,614	16,593
4,93 - 0,42	15,493	15,123	15,300
4,93 - 1,37	16,392	14,769	15,507
4,93 - 4,20	16,454	15,949	16,218

Tab. 3.2 Hodnoty RMS signálu z pravého koncového snímače při použití různých povrchů bronzového vzorku měřených na suchém povrchu ocelové tyče.

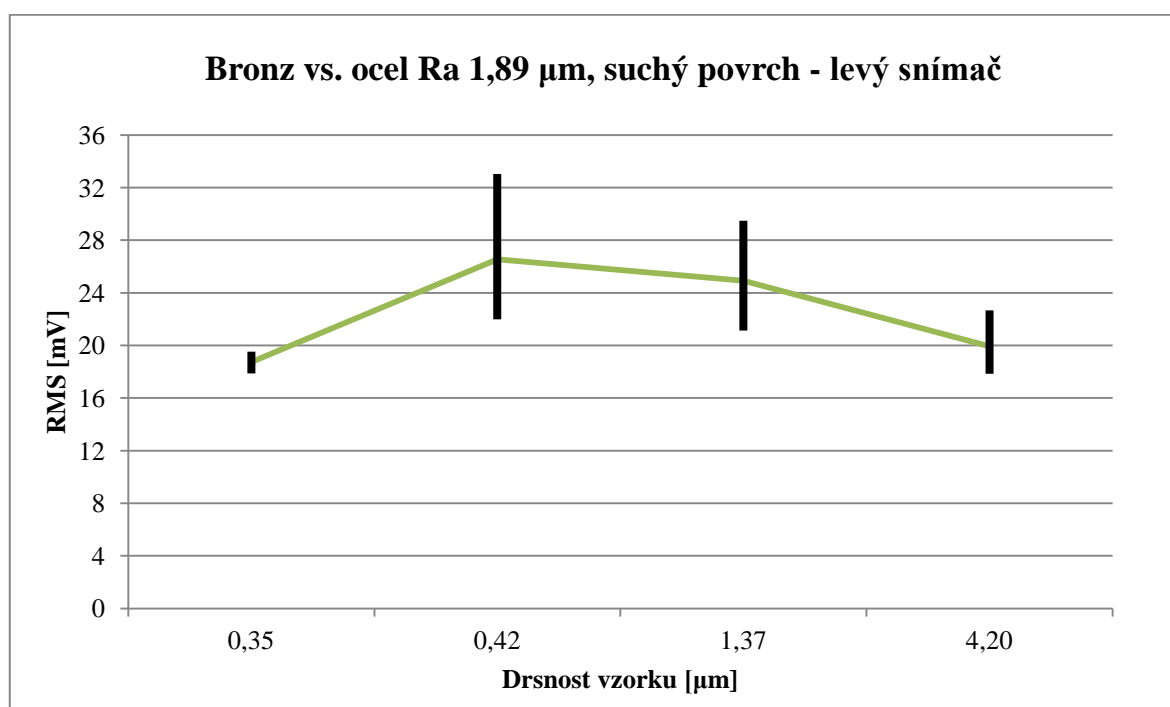
Měření bronzového vzorku			
Pravý snímač			
Drsnost tyče - drsnost vzorku [μm]	Největší hodnota RMS signálu [mV]	Nejmenší hodnota RMS signálu [mV]	Průměrná hodnota RMS signálu [mV]
1,89 - 0,35	18,418	17,288	17,896
1,89 - 0,42	23,083	18,688	20,844
1,89 - 1,37	29,490	22,898	24,263
1,89 - 4,20	19,856	16,517	18,165
4,93 - 0,35	19,587	17,478	18,531
4,93 - 0,42	12,810	12,697	12,741
4,93 - 1,37	13,167	12,673	12,907
4,93 - 4,20	14,017	13,208	13,492

Z tabulky 3.1 a 3.2 byly vytvořeny dva grafy, zobrazené na obr. 24 a obr. 25 pro drsnost ocelové tyče $1,89\text{ }\mu\text{m}$. Hned na první pohled můžeme pozorovat mírnou odlišnost levého a pravého snímače, kdy největší průměrné hodnoty naměřil levý snímač při drsnosti vzorku $0,42\text{ }\mu\text{m}$, ale pravý snímač při drsnosti $1,37\text{ }\mu\text{m}$. Trend, kdy s narůstající drsností nejprve zvyšuje RMS signál a posléze u největší drsnosti sníží svoji hodnotu, je patrný u obou snímačů. Největší rozptyly mají opět největší průměrné hodnoty signálu.

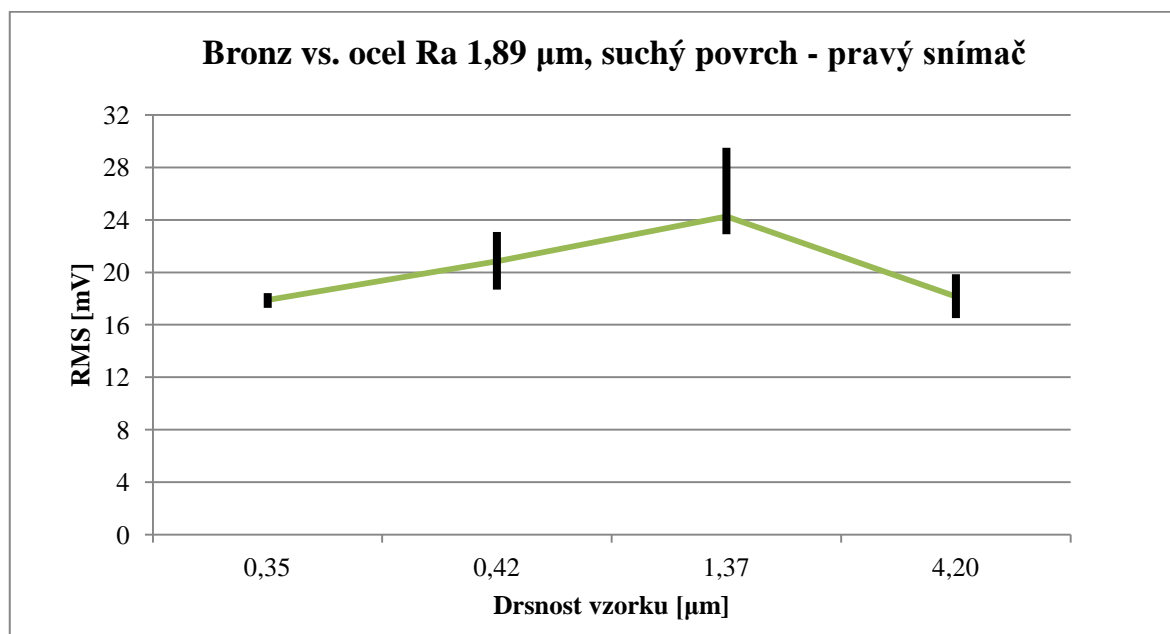
Přibližnou shodnost hodnot naměřených na bronzovém vzorku při drsnosti $4,93\text{ }\mu\text{m}$ ocelové tyče můžeme pozorovat na obr. 26 a obr. 27. Zajímavá je i výsledná křivka propojených průměrných hodnot, kdy hodnoty nejprve klesají, ale mezi drsnostmi vzorku $0,42$ a $1,37\text{ }\mu\text{m}$ začínají mírně stoupat. Na obr. 23 můžeme vidět dvě plochy bronzového vzorku a směr, kterým byl tažen při pohybu po ocelové tyči.



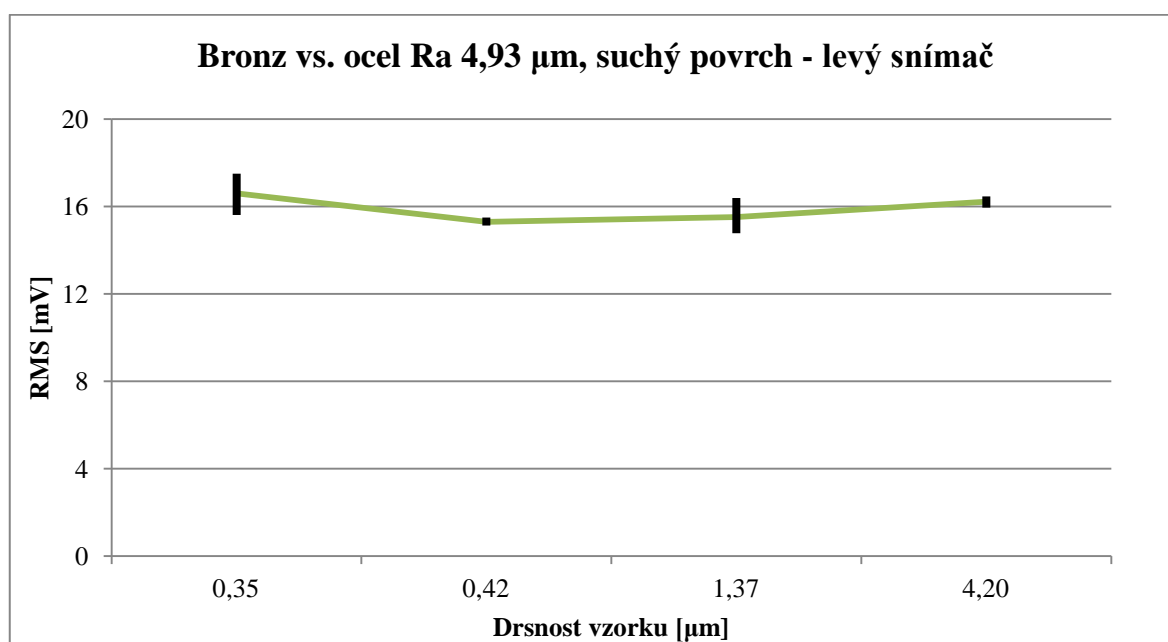
Obr. 23 Plochy bronzového vzorku vlevo $Ra\ 1,37\text{ }\mu\text{m}$, vpravo $Ra\ 4,2\text{ }\mu\text{m}$ a směr pohybu.



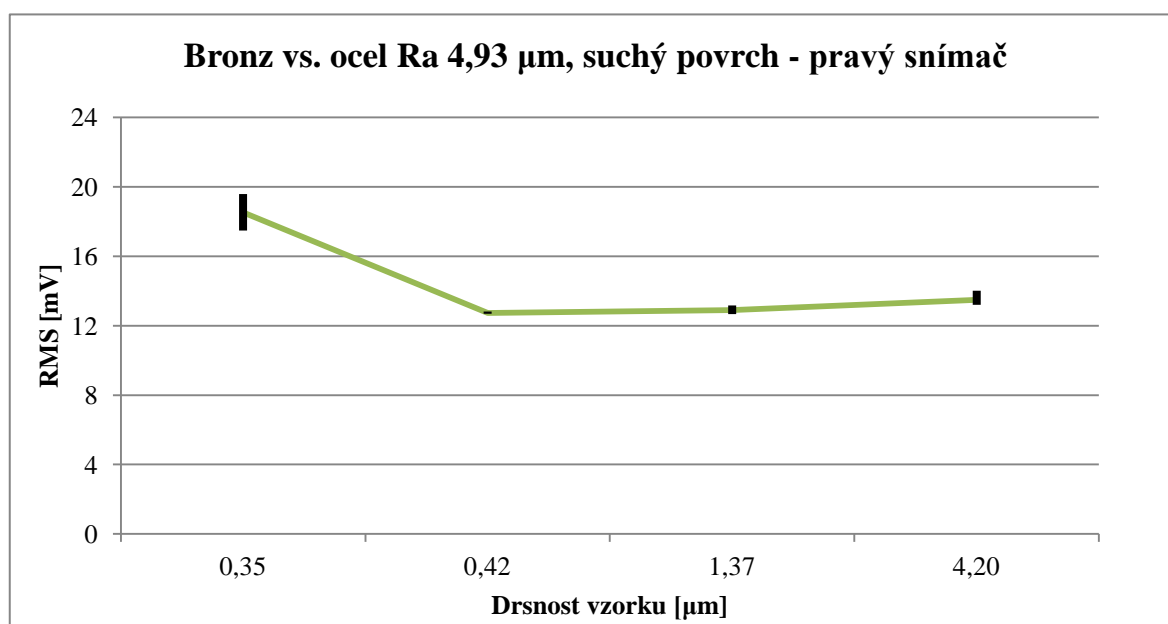
Obr. 24 Změna hodnoty RMS signálu AE - bronz vs. ocel při použití na suchém povrchu, Ra tyče 1,89 μm , hodnoty uvedeny z levého snímače.



Obr. 25 Změna hodnoty RMS signálu AE - bronz vs. ocel při použití na suchém povrchu, Ra tyče 1,89 μm , hodnoty uvedeny z pravého snímače.



Obr. 26 Změna hodnoty RMS signálu AE - bronz vs. ocel při použití na suchém povrchu, Ra tyče 4,93 μm , hodnoty uvedeny z levého snímače.



Obr. 27 Změna hodnoty RMS signálu AE - bronz vs. ocel při použití na suchém povrchu, Ra tyče 4,93 μm , hodnoty uvedeny z pravého snímače.

4.3.2 Výsledky měření na mazaném povrchu

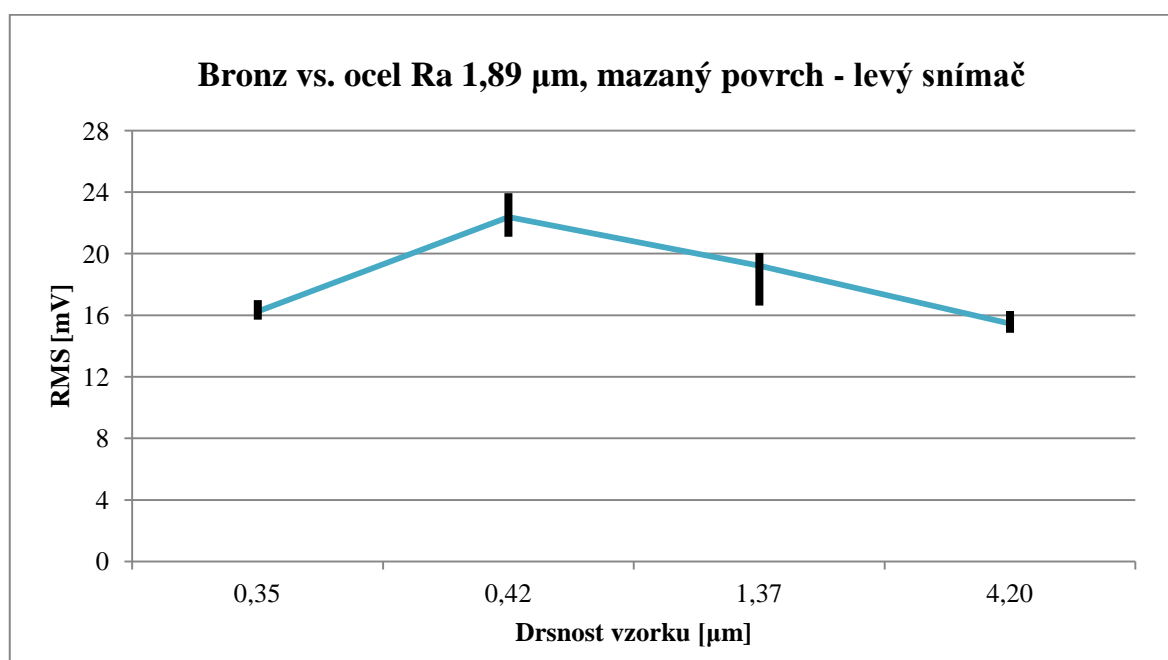
Tab 3.3 Hodnoty RMS signálu při použití různých povrchů bronzového vzorku měřeného na mazaném povrchu ocelové tyče.

Měření bronzového vzorku			
Levý snímač			
Drsnost tyče - drsnost vzorku [μm]	Největší hodnota RMS signálu [mV]	Nejmenší hodnota RMS signálu [mV]	Průměrná hodnota RMS signálu [mV]
1,89 - 0,35	16,989	15,711	16,246
1,89 - 0,42	23,923	21,104	22,378
1,89 - 1,37	20,041	16,625	19,210
1,89 - 4,20	16,274	14,854	15,453
4,93 - 0,35	32,096	29,675	30,758
4,93 - 0,42	21,449	17,437	19,650
4,93 - 1,37	26,293	19,918	23,308
4,93 - 4,20	33,555	30,503	32,329

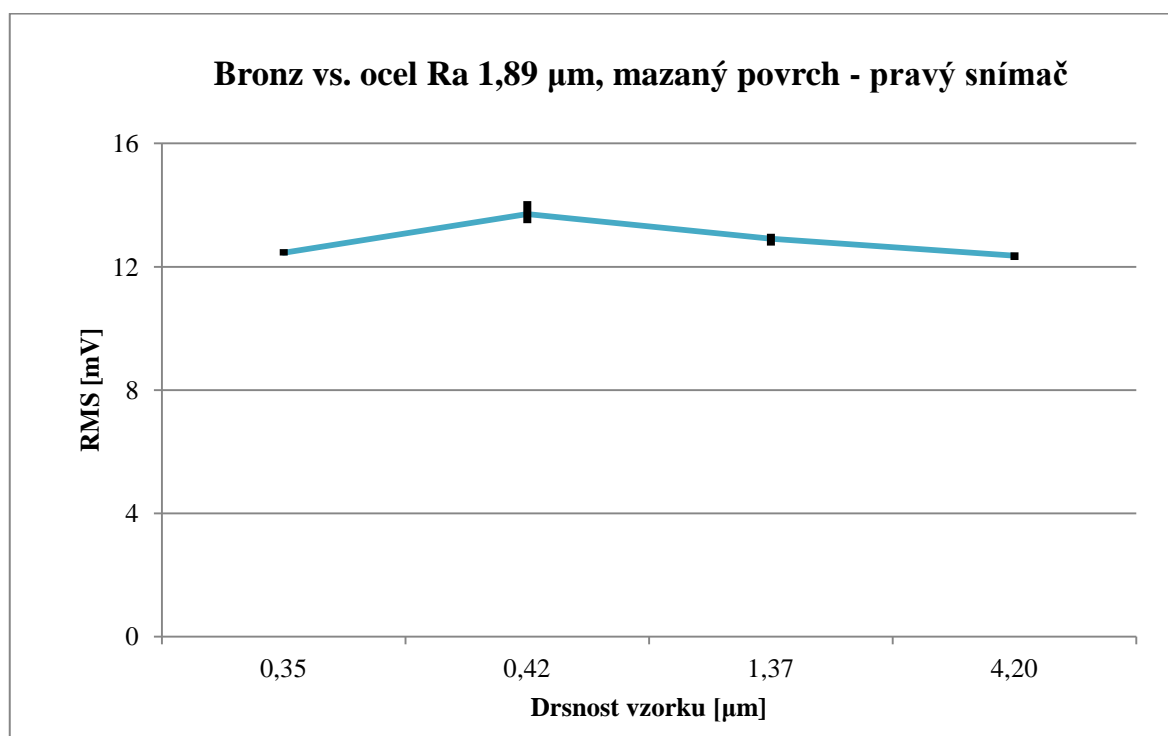
Tab 3.4 Hodnoty RMS signálu při použití různých povrchů bronzového vzorku měřené na mazaném povrchu ocelové tyče.

Měření bronzového vzorku			
Pravý snímač			
Drsnost tyče - drsnost vzorku [μm]	Největší hodnota RMS signálu [mV]	Nejmenší hodnota RMS signálu [mV]	Průměrná hodnota RMS signálu [mV]
1,89 - 0,35	12,573	12,362	12,449
1,89 - 0,42	14,133	13,410	13,704
1,89 - 1,37	13,075	12,686	12,907
1,89 - 4,20	12,464	12,217	12,354
4,93 - 0,35	17,198	16,066	16,503
4,93 - 0,42	14,051	12,982	13,537
4,93 - 1,37	15,207	13,548	14,362
4,93 - 4,20	17,423	16,371	16,958

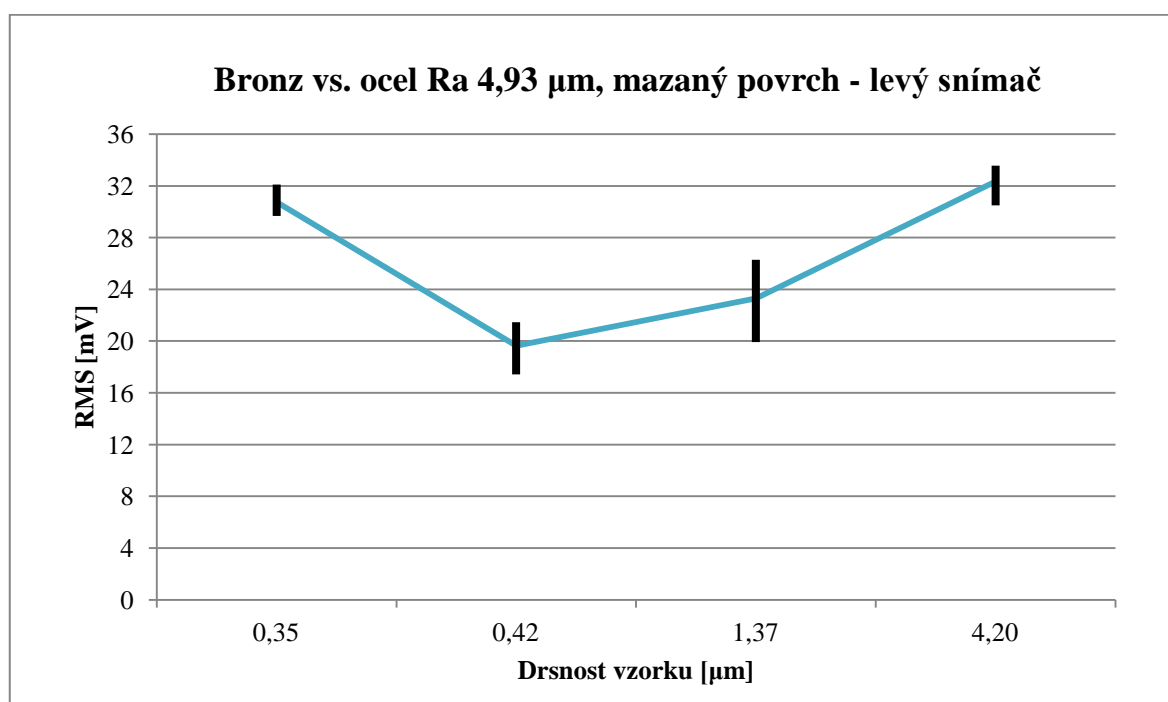
Pokud se podíváme na hodnoty vyexportované z tab. 3.3 a tab. 3.4 zjistíme, že levý snímač oproti pravému vykazuje větší hodnoty RMS signálu a to pro obě drsnosti ocelové tyče.



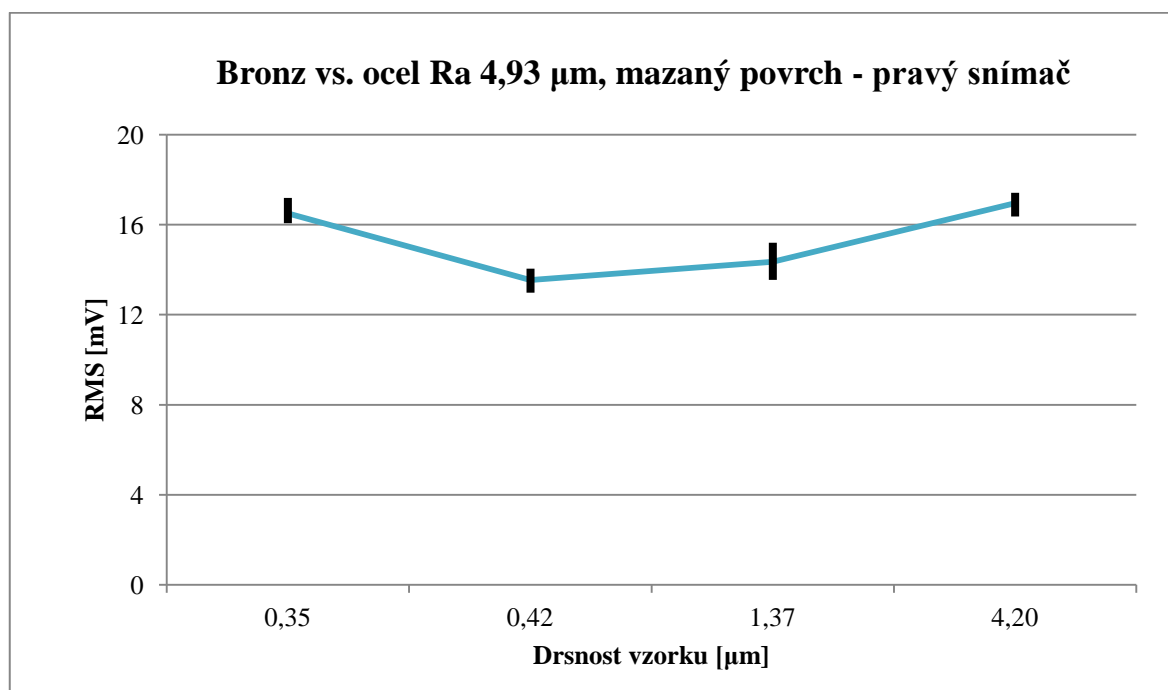
Obr. 28 Změna hodnoty RMS signálu AE - bronz vs. ocel při použití na mazaném povrchu, Ra tyče 1,89 μm , hodnoty uvedeny z levého snímače.



Obr. 29 Změna hodnoty RMS signálu AE - bronz vs. ocel při použití na mazaném povrchu, Ra tyče 1,89 μm , hodnoty uvedeny z pravého snímače.



Obr. 30 Změna hodnoty RMS signálu AE - bronz vs. ocel při použití na mazaném povrchu, Ra tyče 4,93 μm , hodnoty uvedeny z levého snímače.



Obr. 31 Změna hodnoty RMS signálu AE - bronz vs. ocel při použití na mazaném povrchu, Ra tyče 4,93 μm , hodnoty uvedeny z pravého snímače.

Při kontaktu bronzového vzorku s ocelovou tyčí o drsnosti $1,89\text{ }\mu\text{m}$ je na namazaném povrchu nejdříve patrný nárůst hodnot a poté zlom při drsnosti vzorku $0,42\text{ }\mu\text{m}$ jak je patrné z obr. 28 a obr 29. Zvyšující se drsnosti vykazují nižší hodnoty RMS signálu, což nám potvrzují oba dva snímače.

Stejný trend poklesu hodnoty RMS signálu a následným se zvyšováním jako u suchého povrchu můžeme vidět na grafech v obr. 30 a obr. 31, kdy se vzorek pohyboval po drsnější straně ocelové tyče o drsnosti $4,93\text{ }\mu\text{m}$.

5 DISKUZE

Z provedených experimentálních měření a následujících vyhodnocení lze potvrdit závislost signálu akustické emise na různých drsnostech vzájemně se pohybujících povrchů. Z výsledků uvedených v této práci však nelze tyto závislosti vyhodnotit jednoznačně.

Pokud sledujeme hodnoty RMS signálu při vzájemném kontaktu ocelové tyče a těsníciho kroužku při porovnání s ostatními vzorky, můžeme říci, že dosahují nejnižších průměrných hodnot u suchého kontaktního povrchu. Tato hodnota ovšem může být v nepoměru s velikostí styčné plochy, kdy vzorky mohly emitovat silnější signál kvůli větší styčné ploše.

Při porovnání mezi litinovým a bronzovým vzorkem na suchém povrchu je největší hodnota RMS signálu při použití bronzového vzorku o straně s drsností $0,42\text{ }\mu\text{m}$ při kombinaci s ocelovou tyčí o drsnosti $1,89\text{ }\mu\text{m}$. V tomto případě je však také největší rozptyl hodnot z celkových měření na suchém povrchu jak při použití bronzového tak i litinového vzorku, pokud sledujeme hodnoty z levého počátečního snímače. Ostatní hodnoty drsností na bronzovém vzorku vykazovaly pokles hodnoty RMS. Nejnižší průměrnou hodnotu RMS signálu vykazoval vzorek vyrobený z šedé litiny při kombinaci drsností $1,89\text{ }\mu\text{m}$ ocelové tyče - $0,2\text{ }\mu\text{m}$ strany vzorku. Paradoxem je, že tato hodnota $14,579\text{ mV}$ se nejvíce blíží hodnotě $14,745\text{ mV}$ naměřené při kombinaci drsností $1,89\text{ }\mu\text{m}$ ocelové tyče - $3,91\text{ }\mu\text{m}$ strany litinového vzorku, tedy kontaktní plochy s největší námi měřenou drsností. U ostatních hodnot byl signál větší přibližně v řádu desítek mV.

Obdobný trend pro největší i nejmenší naměřený signál jako u suchého povrchu vykazuje i povrch namazaný. Hodnota největšího průměrného signálu dosahuje hodnoty $30,758\text{ mV}$ naměřené při kombinaci drsností $4,93\text{ }\mu\text{m}$ ocelové tyče - $0,35\text{ }\mu\text{m}$ strany bronzového vzorku. Nejnižší průměrnou hodnotu RMS signálu dosahuje litina při kombinaci drsností $1,89\text{ }\mu\text{m}$ ocelové tyče - $3,91\text{ }\mu\text{m}$ strany vzorku, což potvrzují oba dva snímače.

Rozdíl u mazaných kontaktů oproti suchému povrchu byl pozorován u ocelové tyče $R_a 1,89\text{ }\mu\text{m}$ s kombinací různých povrchů litinového vzorku viz obr. 21, kdy je možné vidět jednoznačný pokles hodnot RMS s rostoucí drsností povrchu. Při provedení stejného měření na ocelové tyči o drsnosti $R_a 4,93\text{ }\mu\text{m}$ se obdobný pokles neprojevil a s rostoucí drsností se nejprve signál zvyšuje a u nejvyšší drsnosti vidíme pokles hodnoty.

Při použití bronzového vzorku vs. ocelová tyč o drsnosti $R_a 1,89$ při mazaném kontaktu se průběh liší od litiny a s narůstající drsností nejprve signál stoupá a mezi drsnostmi $0,42$, $1,37\text{ }\mu\text{m}$ má klesající tendenci. Naopak při použití ocelové tyče o drsnosti $R_a 4,93\text{ }\mu\text{m}$ je průběh opačný, nejprve signál klesá a při drsnostech $R_a 0,42$, $1,37\text{ }\mu\text{m}$ má vzrůstající tendenci.

ZÁVĚR

Z měření provedených v této bakalářské práci při experimentálních měření a následných vyhodnocení vlivu změny drsnosti vzájemně se pohybujících povrchů na signálu akustické emise lze potvrdit vzájemnou závislost těchto parametrů. Byly změřeny hodnoty AE na litinovém a bronzovém vzorku při kontaktu s ocelovou tyčí a to jak na suchém tak při mazaném povrchu. Při současném stavu poznání vycházející z této práce nelze tyto závislosti vyhodnotit jako jednoznačné, ale jsou jasně patrné rozdíly při použití různě drsných povrchů stejného materiálu. Rozdíly mezi bronzovým a litinovým vzorkem se nejvíce projevily při kontaktu s nejdrsnější stranou ocelové tyče, kdy se průběhy drsností liší jak při suchém tak i namazaném kontaktu. Na základě výsledků a současného stavu poznání bych doporučil v měření pokračovat, ale za rozdílných podmínek sledování parametrů, např. sledovat chování jednotlivých vzorků pod různým zatížením při měření. Tato metoda by mohla pomoci při výběru vhodných drsností vzájemně se pohybujících povrchů různých materiálů a tím zajistit dlouhodobou provozní spolehlivost.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. KREIDL, Marcel a ŠMÍD, Radoslav. *Technická diagnostika*. 1. vyd. Praha: BEN-technická literatura, 2006. 408s. ISBN 80-7300-158-6
2. PŘIBÁN, M. *Metoda akustické emise I: Obecná část – základní principy*. Česká společnost pro NDT, Brno 2012.
3. KOPEC, Bernard; a kol. *Nedestruktivní zkoušení materiálů a konstrukcí*. 1. vyd. Brno: CERM s.r.o., 2008, 571 s. ISBN 978-80-7204-591-4.
4. BUMBÁLEK, Bohumil, Vladimír ODVODY a Bohuslav OŠŤÁDAL. *Drsnost povrchu*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1989, 338 s.
5. ČECH, Jaroslav, Jiří PERNIKÁŘ a Kamil PODANÝ. *Strojírenská metrologie I*. Vyd. 5., V Akademickém nakl. CERM vyd. 3. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2009. Učební texty vysokých škol (Vysoké učení technické v Brně). ISBN 978-80-214-4010-4.
6. FIALA, Jaroslav a Ivo KRAUS. *Povrchy a rozhraní*. Vyd. 1. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2009, 299 s. ISBN 978-80-01-04248-9.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratka	Jednotka	Popis
AE	[-]	akustické emise
NDT	[-]	nedestruktivní metody materiálu
RMS	[-]	root mean square (efektivní hodnota charakterizující energii signálu)
např.	[-]	například

Symbol	Jednotka	Popis
F	[N]	síla
Ra	[μm]	střední aritmetická hodnota drsnosti